GRUNDRISS

DER

ELEKTROTECHNIK

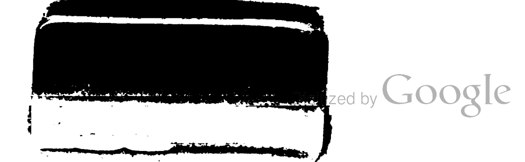
Verfasst von

HEINRICH KRATZERT.

II. Teil, 1. Buch

LEIPZIG UND WIEN
FRANZ DEUTICKE





GRUNDRISS
DER
ELEKTROTECHNIK

für den praktischen Gebrauch, für Studierende der Elektrotechnik und zum Selbststudium,

verfaßt von

Heinrich Kratzert,

k. k. Professor für Elektrotechnik an der Fachschule für Elektrotechnik, der k. k. Staatsgewerbeschule in Wien X., vorm. Oberingenieur etc. der Vereinigten Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft in Wien und Chef-Elektriker etc. der Siemens & Halske A.-G.

II. Teil, 1. Buch.

Wechselströme, Wechselstrommaschinen, -Motoren und -Transformatoren.

Mit 293 Figuren.

LEIPZIG UND WIEN.
FRANZ DEUTICKE.
1903.

Verlags-Nr. 861.

Vorwort zur zweiten Auflage.

Die Quellen für das 1. Buch des II. Teiles des Grundrisses der Elektrotechnik (Wechselströme, Wechselstrommaschinen, -Motoren und -Transformatoren) bilden, außer der ersten Auflage derselben Arbeit, die Fachliteratur, Veröffentlichungen und Mitteilungen von Firmen ersten Ranges sowie Forschungen und Erfahrungen des Verfassers. Derselbe war bestrebt die benutzten Quellen vollständig anzugeben und auch auf solche hinzuweisen, welche eine besondere Anregung zu weiterem Studium geben sollen.

Dieses Buch ergänzt den bereits in den vorhergehenden sechs Büchern über dieselben Gegenstände eingestreuten Stoff und wiederholt dabei in neuer Darstellung einige wenige Lehren aus dem früheren, damit dasselbe auch tunlichst unabhängig von den anderen Büchern gelesen werden kann.

Der Verfasser hat sich der wohl nicht leichten Aufgabe unterzogen, den behandelten Stoff in einfachster Weise wiederzugeben und so dieses Buch weiten Kreisen zugänglich zu machen. Letzteres löst mit Hülfe von möglichst wenig Theorie und Mathematik die wichtigsten Aufgaben der Praxis.

Als Unterlage für die Berechnung von Wechselstrommaschinen, -Motoren, -Transformatoren, Drosselspulen und Divisoren dienen ausgeführte Konstruktionen, so daß Resultate und Versuchsergebnisse miteinander übereinstimmen. Bei der Berechnung der Transformatoren wurde eine bewährte Type gewählt, welche in der Literatur noch nicht berechnet erscheint.

Unter den ausgeführten Konstruktionen werden nur solche beschrieben, welche in der Praxis eine besondere Rolle spielen.

Das Werk stammt aus praktischer und theoretischer Tätigkeit und ist für die Praxis, für Studierende der Elektrotechnik und zum Selbststudium bestimmt.

Der Grundriß der Elektrotechnik umfaßt in der neuen Auflage in sieben Büchern die gesamte Starkstrom-Elektrotechnik und löst, wie bisher kein anderes Werk, die wichtigsten Aufgaben aus sämtlichen Gebieten der Starkstrom-Elektrotechnik. Sache der Leser wird es sein zu beurteilen, wie die Arbeit auf den ersten Wurf gelungen ist.

Wien, im Jänner 1903.

Der Verfasser.

Inhalts-Verzeichnis.

Wechselströme, Wechselstrommaschinen, -Motoren und -Transformatoren.

I. Abschnitt.

Wechselströme.

Seite

Seite

II. Abschnitt.

Wechselstrommaschinen.

III. Abschnitt.

Wechselstrommotoren.



IV. Abschnitt.

Generatoren und Motoren.

V. Abschnitt.

Transformatoren.

I. Kapitel. Wechselstromumsetzer.

Wechselströme, Wechselstrommaschinen, Motoren und Transformatoren.

I. Abschnitt.

Wechselströme.

I. Kapitel.

Allgemeines.

1. Abnahme von Gleich- und Wechselstrom aus einem Anker. Die dynamoelektrischen Maschinen, auch kurz Dynamo-(Kraft-)Maschinen genannt, erzeugen, wenn man sie durch eine mechanische Maschine (Dampfmaschine, Turbine, Gasmotor) antreibt, elektrische Ströme.

Die Figuren 1 bis 9 stellen Dynamomaschinen vor und bringen die Stromentnahme und Stromerzeugung in denselben zur Darstellung. Die Hauptbestandteile der Dynamomaschinen sind:

I. Der Anker (Induktor, Armatur); derselbe zerfällt in folgende Teile:

1. Die Welle; diese besteht zumeist aus Stahl oder Schmiedeisen.

2. Der Eisenkern. Auf die Welle ist der Eisenkern aufgebaut. Letzterer wird aus weichen Eisenblechen, welche durch dünnes Papier voneinander isoliert sind, zusammengesetzt. In den Schemen, Fig. 1 bis 3 und 4 bis 9, umgrenzen den Eisenkern die beiden großen, konzentrischen Kreise, so dass also jedes Eisenblech zwischen diesen Kreisen eingeschlossen erscheint.

3. Die Ankerwicklung. In den Figuren 1 bis 3 und 4 bis 9 stellen die über dem Eisenkerne eingezeichneten spiralförmigen Linien die Windungen der Ankerwicklung dar. Dieselbe besteht gewöhnlich aus isoliertem Kupferdrahte. Die Wicklung ist auf einem isolierten Eisenkern aufgewickelt. Als Isolation verwendet man für den Eisenkern Preßspan und Bänder aus Leinwand, Seide u. s. w.

4. Der Kollektor oder die Schleifringe. Kollektor und Schleifringe dienen zur Abnahme des Stromes. Gleichstrommaschinen, Fig. 1 bis 4, müssen Kollektoren erhalten. Die beiden innersten kon-

zentrischen Kreise der letzten Figur schließen den Kollektor ein. Derselbe besteht aus einzelnen Teilen (Segmenten), welche voneinander isoliert sind. In den Figuren 1 bis 3 ist der Kollektor, wie ersichtlich, sechsteilig. An den letzteren wird, so wie es dieselben Figuren zeigen, die Ankerwicklung leitend angeschlossen. Bei den Wechselstrommaschinen, Fig. 5 bis 9, wird der Strom nicht von einem Kollektor, sondern von Schleifringen abgenommen. Die genannten Figuren geben auch die Verbindung zwischen der Ankerwicklung und den Schleifringen wieder. Eisenkern, Kollektor und Wicklung sind untereinander und mit der Welle fest verbunden.

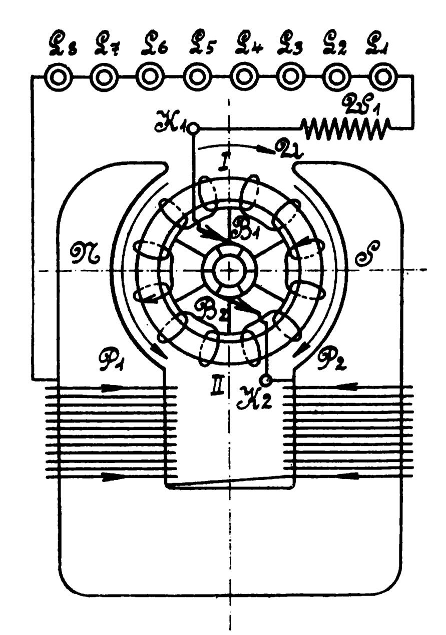


Fig. 1. Abnahme von Gleichstrom. Ankerstellung *I*, *II*.

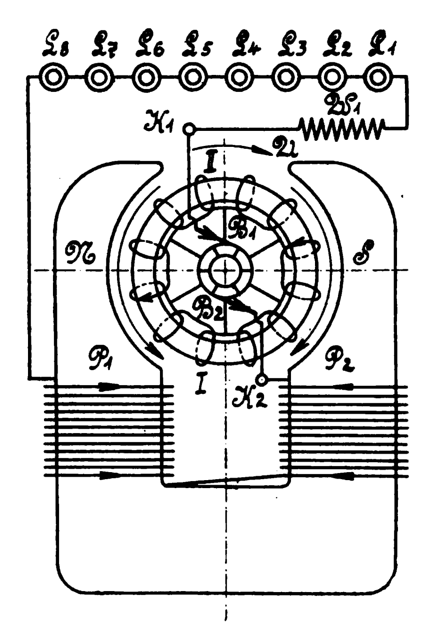


Fig. 2. Abnahme von Gleichstrom. Ankerstellung *II*, *I*.

II. Der Bürstenapparat. Auf dem Kollektor beziehungsweise auf den Schleifringen liegen die in den Figuren 1 bis 9 ersichtlichen Bürsten B_1 und B_2, Fig. 1. Die Bürsten werden, so wie es Fig. 4 zeigt, auf einer sogenannten Bürstenbrücke, isoliert befestigt; sie sind, behufs Einstellung der Maschine auf funkenfreien Gang, verstellbar, drehen sich jedoch nicht mit dem Anker.

III. Der Feldmagnet mit den Polen N und S, Fig. 1 bis 3 und 5 bis 9. Letzterer besteht zumeist aus massivem Stahlguss, seltener aus Schmied- oder Gußeisen. Dieser Eisenkern ist mit voneinander

isolierten, kupfernen Windungen so umgeben, wie es die eben erwähnten Schemen andeuten. In denselben Figuren besitzt der Feldmagnet die Form eines Hufeisens. Die Enden N und S nennt man Polschuhe, den mittleren Teil das Joch und den Teil, auf welchem sich die Wicklung befindet, den Kern. In den Figuren 1 bis 3 und 5 bis 9 sind die Klemmen der Maschinen, an welchen die letzteren an das Leitungsnetz angeschlossen werden, mit den Buchstaben K_1, K_2 u. s. w., die eingeschalteten Lampen mit den Buchstaben L_1, L_2 u. s. w., die Widerstände mit den Buchstaben W_1, W_2 u. s. w. und die Umdrehungsrichtung des Ankers mit einem Pfeile und dem danebenstehenden Buchstaben U bezeichnet. Die Pfeile in den einzelnen Windungen der Ankerwicklung geben die Stromrichtung an, während die Pfeile P_1 und P_2 den Sinn des Stromverlaufes in den beiden Ankerhälften veranschaulichen sollen.

Die Erzeugung von Gleichstrom erfolgt nun in der folgenden Weise:

Jedes weiche Eisen, also auch das Eisen des Feldmagneten, wird von Natur aus von Kraftlinien (I. T., 1. B., S. 54 ff.) durchflossen oder ist, wie man kurz zu sagen pflegt, magnetisch. Falls diese Kraftlinien (natürlicher Magnetismus) unzulänglich sind, genügt ein einmaliges Magnetisieren des Eisens durch eine fremde Stromquelle (Dynamo, Akkumulator) zur Erzeugung einer genügend großen Anzahl von Kraftlinien. Man schaltet zu diesem Behufe die Windungen des Feldmagneten ganz kurze Zeit an eine Dynamo oder an einen Akkumulator (II. T., 4. B., S. 77). Diesen Vorgang bezeichnet man als **fremde Erregung** der Dynamo. War letztere bereits im Betrieb, dann besitzt sie genügend viele Kraftlinien (zurückbleibenden oder

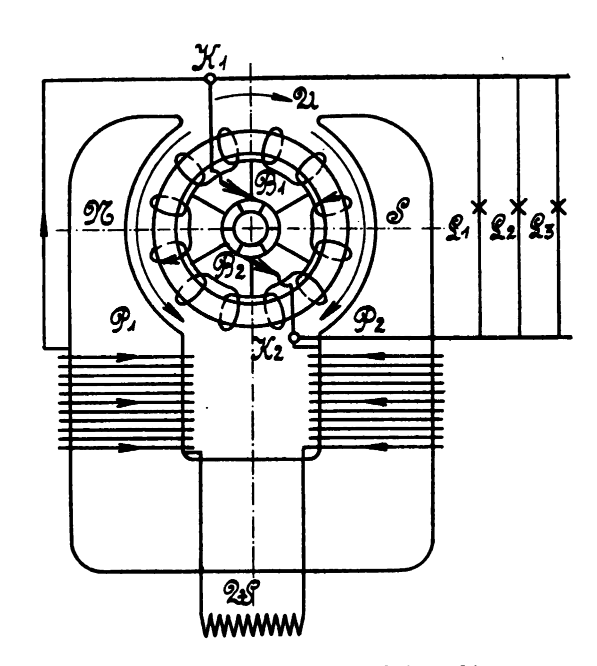


Fig. 3. Gleichstrom-Nebenschlußmaschine.

remanenten Magnetismus) für einen weiteren Betrieb. Der Feldmagnet sendet Kraftlinien aus. Dieselben treten vom Nordpole N in zwei Zweigen durch das Ankereisen zum Südpole S über und gehen durch das Magneteisen zum Nordpole N zurück (I. T., 1. B., S. 57, Fig. 55). Der Anker befindet sich demnach in einem magnetischen Felde (I. T., 1. B., S. 56). Solange der Anker feststeht, wird in den Ankerwindungen kein Strom erzeugt. Dreht sich jedoch der letztere, so entsteht in seinen Windungen durch Induktion (I. T., 1. B., S. 61) ein galvanischer Strom von ganz geringer Stärke. In den Ankerwindungen herrscht eine bestimmte elektromotorische Kraft (I. T., 1. B., S. 14), gemessen in Volt, an den Klemmen der Maschine eine bestimmte Klemmenspannung, gemessen in Volt. Die elektromotorische Kraft (EMK) ist die Ursache der Elektrizitätsbewegung. Da dieselbe den Ankerwiderstand zu überwinden hat, muß sie größer sein als die Klemmenspannung an den Klemmen K_1 und K_2, Fig. 1, der Maschine.

Ankerwicklung, Magnetwicklung, Widerstand W_1, Fig. 1 und 2, und Lampen L_1, L_2 u. s. w. können entweder hintereinander, Fig. 1 und 2, oder nebeneinander, Fig. 3, geschaltet sein. Die in den Fig. 1 und 2 dargestellte Maschine nennt man deshalb Hauptstrom- oder Reihen- oder Serienmaschine, die Maschine (Fig. 3) dagegen Nebenschlußmaschine.

Schickt man den durch Drehung des Ankers in demselben erzeugten (induzierten) Strom gänzlich (Hauptstrommaschine) oder teilweise (Nebenschlußmaschine) durch die Magnetwicklung, so wird in dem Eisen des Feldmagneten eine größere Anzahl Kraftlinien erzeugt und diese induzieren wieder einen stärkeren Strom im Anker. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis die Maschine den vollen Strom gibt. Sobald dieselbe die vollen Umdrehungen erreicht, gibt sie auch den vollen Strom. Diese Art der Erregung der Feldmagnete nennt man zum Unterschiede von der obenerwähnten fremden Erregung Selbsterregung. Letztere erfand Werner v. Siemens im Jahre 1867; bis zu diesem Jahre wurde die recht unpraktische fremde Erregung bei den Dynamomaschinen so durchgeführt, daß man in die Magnetwicklung derselben magnetelektrische Maschinen (I. T., 1. B., S. 66) einschaltete, welche anstatt der Elektromagnete (Feldmagnete) Stahlmagnete besitzen.

Man unterscheidet Außen- und Innenpolmaschinen. Bei den ersteren befindet sich der Anker innerhalb der Polschuhe des Feldmagneten, so wie es die Figuren 1 bis 9 zeigen, bei den Innenpolmaschinen außerhalb der Polschuhe der Feldmagnete.

Die Richtung des in den Ankerwindungen induzierten Stromes läßt sich in sehr einfacher Weise nach dem Gesetze von Lenz und nach den praktischen Regeln von Ampère, Faraday, J. A. Fleming,[1]) A. v. Waltenhofen[2]) und nach einer von mir[3]) angegebenen Regel bestimmen.

Befindet sich, wie es die Figuren 1 bis 9 wiedergeben, der Anker innerhalb der Polschuhe des Feldmagneten (Außenpolmaschine) und dreht sich der Anker, so lautet die letzte Regel:

Bei Linkslauf des Ankers einer Dynamomaschine haben Kraftlinien und Strom an den Stirnflächen des Ankers dieselbe Richtung.

Je einen Wechsel dieser Richtungen bedingen: Änderung der Laufrichtung (Rechts- oder Linkslauf), Änderung der Anordnung der Pole (Außen- oder Innenpole), Drehung des Ankers oder des Feldmagneten.

Schickt man in eine Dynamo Strom, so läuft dieselbe als Elektromotor an. Für die Bestimmung der Stromrichtung in Elektromotoren lautet obige Regel:

Bei Rechtslauf des Ankers eines Elektromotors haben Kraftlinien und Strom an den Stirnflächen des Ankers dieselbe Richtung.

Für den Wechsel dieser Richtungen gelten ebenfalls die oben bei der Regel für Dynamomaschinen angegebenen Bedingungen.

Mit Hülfe der Stromrichtungsregel für Dynamomaschinen bestimmen wir nun die Stromrichtung wie folgt: Die Kraftlinien treten außerhalb eines Magneten immer vom Nordpole zum Südpole über. Bezüglich der Ankerwicklung sei noch hervorgehoben, daß z. B. in Fig. 1 der stark ausgezogene Teil jeder Windung vorn liegt, der punktierte Teil jedoch rückwärts. Nachdem die Dynamo, Fig. 1, mit Rücksicht auf den Pfeil U Rechtslauf hat, so fließen Strom und Kraftlinien an der vorderen Stirnfläche in entgegengesetzter Richtung. Die Kraftlinien treten vom Nordpole zum Südpole über, also von links nach rechts. Der Strom fließt also entgegengesetzt, d. h. von rechts nach links, so wie es die beiden in die Ankerwindungen eingezeichneten Pfeile anzeigen. Sieht man den Anker von der den Bürsten entgegen-

---

[1]) J. A. Fleming, The Electrician, 14. Bd., S. 396.

[2]) A. v. Waltenhofen, Zeitschrift für Elektrotechnik, 1887, S. 263 ff.

[3]) H. Kratzert, Elektrotechnische Rundschau, 1893, Heft 16; Elektrotechniker, Wien, XII. Jahrgang, S. 569; Zeitschrift für Elektrotechnik, Wien 1893, Seite 242; Bulletin de la Société internationale des électriciens, Tome X, Juin 1893, S. 308; Elektrotechnischer Anzeiger, Berlin 1893, Nr. 74.

gesetzten Seite an, so hat die Maschine Linkslauf und übereinstimmend damit fließt der Strom an der rückwärtigen Stirnfläche von Nord nach Süd, also in der entgegengesetzten Richtung wie die Kraftlinien. Der Strom fließt demnach in der linken Ankerhälfte im Sinne des Pfeiles P_1, in der rechten Ankerhälfte im Sinne des Pfeiles P_2 und muß deshalb zwischen diesen Punkten P_1 und P_2 an dem Kollektor mit Hülfe der Bürsten B_1 und B_2 abgenommen werden. Der Strom tritt also in Figur 1 an der unteren Bürste B_2 aus und an der oberen Bürste B_1 ein. Geht man in der Richtung der Pfeile in den Ankerwindungen weiter, so kann man sofort die Stromrichtung an den Bürsten finden. Dreht man den Anker eine halbe Umdrehung (180°) weiter, aus der Stellung *I*, *II*, Fig. 1, in die Stellung *II*, *I*, Fig. 2, so sieht man, daß der Strom an den Bürsten dieselbe Richtung behält. Nach einer weiteren halben Umdrehung gilt wieder die Stellung Fig. 1. Der Strom hat also an den Bürsten wieder dieselbe Richtung u. s. w. Der Strom besitzt deshalb nach jeder halben Umdrehung dieselbe Richtung, es ist Gleichstrom.

Die Eisenbleche des Ankers müssen voneinander durch dünnes Papier isoliert sein, weil sonst in dem Eisenkerne Induktionsströme in derselben Richtung wie in den Windungen erzeugt würden. Solche Ströme erwärmen den Anker und tilgen Arbeit. Die Isolation befindet sich in der Richtung der Induktionsströme, so daß dieselben nicht zu stande kommen, während die Kraftlinien durch diese Isolation keine Widerstandsvermehrung auf ihrem Wege erfahren.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß die Dynamomaschinen wesentlich auf der durch die Grundversuche nachgewiesenen Induktion (I. T., 1. B., S. 61 bis 80) beruhen.

Die Figuren 1 und 2 stellen die Stromerzeugung in einer Hauptstrommaschine, die Figur 3 in einer Nebenschlußmaschine dar. In Fig. 2 stellt *W* einen Widerstand, z. B. aus Neusilberdraht bestehend, dar, welcher in die Magnetwindungen eingeschaltet ist und zur Veränderung der Stromstärke dient.

Fig. 4 stellt eine von mir gebaute Gleichstrommaschine dar. Der Magnetkörper, die Grundplatte und die Lagerständer sind aus einem Stücke gegossen (Stahlguß). Die Magnetkerne haben einen kreisförmigen Querschnitt. Als charakteristisch kann es bei dieser Maschine bezeichnet werden, daß die Polschuhe so ausgebohrt sind, daß die Polflächen das größtmögliche Flächenausmaß erhalten. Die Bohrung reicht nämlich bis zur Achse der Kerne. Der Eisenkern des Trommelankers ist, ohne jede Isolation, unmittelbar auf die Welle aufgesetzt. Die Eisenscheiben sind durch dünnes Papier

voneinander isoliert und durch stärkere Endscheiben verschraubt. Die Trommeln besitzen am Umfange in der Regel Nuten und sind nur selten glatt. Bei glatten Ankern ist die gegenseitige Verschiebung der Drähte am Umfange durch Anbringung von festen Keilen hintangehalten. Für höhere Leistungen finden Litzen oder parallel geschaltete Drähte Verwendung. Trotz des verhältnismäßig großen Trommeldurchmessers findet fast gar keine Bürstenverschiebung

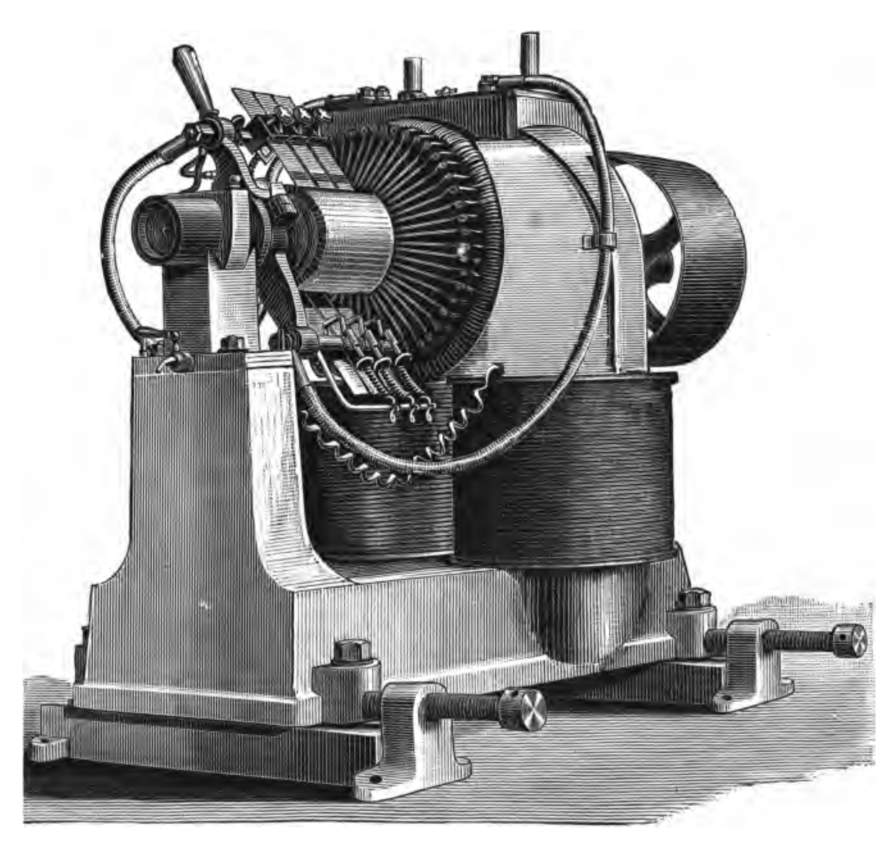


Fig. 4. Gleichstrom-Nebenschlußmaschine.
Modell E der Vereinigten Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vorm. B. Egger & Co. in Wien.

statt. Der Kollektor ist isoliert auf eine eiserne Büchse aufgebaut. Die Kollektorteile bestehen aus Bronzeguß und sind voneinander und von der Büchse für hohe Spannungen durch Glimmer, für niedrige durch Preßspan isoliert. Die Kollektorbüchse ist auf der Welle verkeilt oder verschraubt. Eine eigene Bürstenvorrichtung ermöglicht eine sichere Handhabung der Bürsten. Für größere Leistungen besitzen die Maschinen

auf jedem der beiden Bürstenhalter mehrere Bürsten nebeneinander. Das Auswechseln und die Einstellung einzelner Bürsten kann dann während des Betriebes anstandslos vorgenommen werden. In der Figur ist auch eine Riemenspannvorrichtung ersichtlich. Die Lager sind mit selbsttätiger Ringschmierung versehen. Diese Maschinen wurden von mir zuerst im Jahre 1888 in den verschiedenen Größen von 200 Watt aufwärts berechnet und finden mit den verschiedensten Spannungen und Schaltungen für Licht und Kraft Verwendung. Angaben über ausgeführte solche Maschinen sind im I. Teil, 2. Buch, Seite 232 und 233, wiedergegeben.

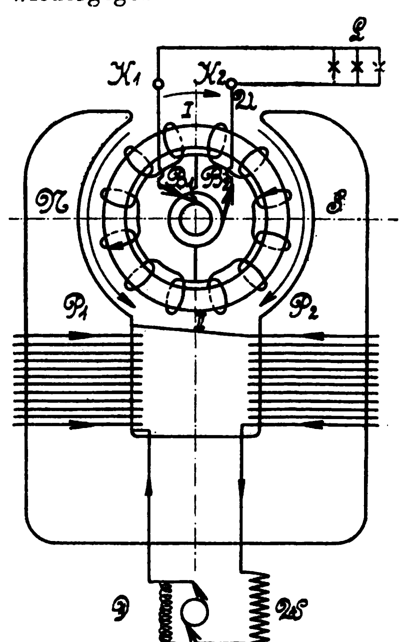


Fig. 5. Abnahme von Einphasen-Wechselstrom. Ankerstellung *I*, *II*.

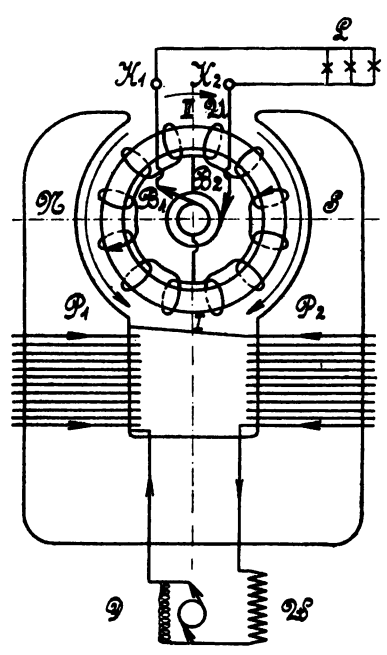


Fig. 6. Abnahme von Einphasen-Wechselstrom. Ankerstellung *II*, *I*.

Die Erzeugung von Wechselstrom veranschaulichen die Figuren 5 bis 9. Die Abnahme von einem Wechselstrom (Einphasenstrom) aus einem Anker geben die Figuren 5 und 6 wieder. Während bei der Gleichstrommaschine viele Punkte der Ankerwicklung an den Kollektor angeschlossen sind, werden bei der einphasigen Wechselstrommaschine nur zwei gegenüberliegende Punkte der Ankerwicklung mit zwei Schleifringen leitend verbunden. In den Figuren sind die zwei Schleifringe durch die beiden kleinen konzentrischen Kreise dargestellt. In den praktischen Ausführungen haben diese beiden Ringe gleiche

Durchmesser und sind auf die Welle isoliert aufmontiert. Wie aus den Figuren 5 bis 9 ersichtlich ist, werden die Wechselstrommaschinen durch die Gleichstrommaschinen *D* fremd erregt. Der Erregerstrom kann durch den Widerstand *W* reguliert werden. Da die Maschine, Fig. 5 und Fig. 6 Rechtslauf hat, besitzen die induzierten Ströme die entgegengesetzte Richtung wie die Kraftlinien, somit ergeben sich die Pfeile in den Ankerwindungen in der Richtung vom Südpole *S* zum Nordpole *N*. In der Stellung *I*, *II*, Fig. 5, tritt der Strom bei der Klemme K_1 aus, bei der Klemme K_2 ein. Nach einer halben Umdrehung kommt der Anker in die Stellung *II*, *I*, Fig. 6; dann tritt der Strom bei der Klemme K_2 aus, bei der Klemme K_1 ein. Nach einer weiteren halben Umdrehung gilt wieder die Stellung *I*, *II*, Fig. 5, u. s. w., der Strom wechselt deshalb nach jeder halben Umdrehung seine Richtung, es ist Wechselstrom. Die Lage der Verbindungsleiter zwischen Ankerwicklung und Schleifringen ändert sich mit der Drehung des Ankers fortwährend. In den Bildern, Fig. 5 und 6, stehen diese Anschlüsse, wie man aus den Figuren ersieht, senkrecht. Liegen diese Anschlüsse horizontal, so wird in diesem Augenblicke kein Strom abgenommen, es findet Stromrichtungswechsel statt. Hat die Dynamo z. B. zwischen den Klemmen K_1 und K_2 100 Volt, so verteilt sich diese Spannung zwischen dem obersten Punkte *I*, Fig. 5, und dem untersten Punkte *II* der Ankerwicklung. An den äußersten Punkten der Ankerwicklung links und rechts in der Figur ist die Spannung etwa 50 Volt. Diese Punkte haben also gleiche Spannung und zwischen Punkten gleicher Spannung fließt kein Strom. Steht der Anschluß *I* oben, dann hat der Strom eine bestimmte Richtung, steht dieser Anschluß *I* unten, dann hat der Strom die entgegengesetzte Richtung.

Aus den bisherigen Darlegungen folgt, daß in dem Anker jeder Dynamo Wechselstrom erzeugt wird. Durch einen Kollektor kann man Gleichstrom, durch Schleifringe Wechselstrom aus demselben Anker entnehmen. Besitzt ein Anker einen Kollektor und Schleifringe, so kann man am Kollektor Gleichstrom, an den Schleifringen Wechselstrom abnehmen. Schickt man in eine Gleichstrommaschine Gleichstrom, so läuft sie als Gleichstromelektromotor an, schickt man in eine Wechselstrommaschine Wechselstrom, so läuft sie als Wechselstrommotor an.

Besteht die Ankerwicklung aus vier Abteilungen, Fig. 7, und verbindet man je zwei gegenüberliegende Abteilungen so miteinander, daß die Stromrichtungen übereinstimmen (daß sich die Ströme addieren), so erhält man zwei Spulenpaare. Verbindet man des weiteren Anfang und Ende je eines Spulenpaares mit je einem Schleifringe, so sind vier Schleifringe erforderlich und man kann aus

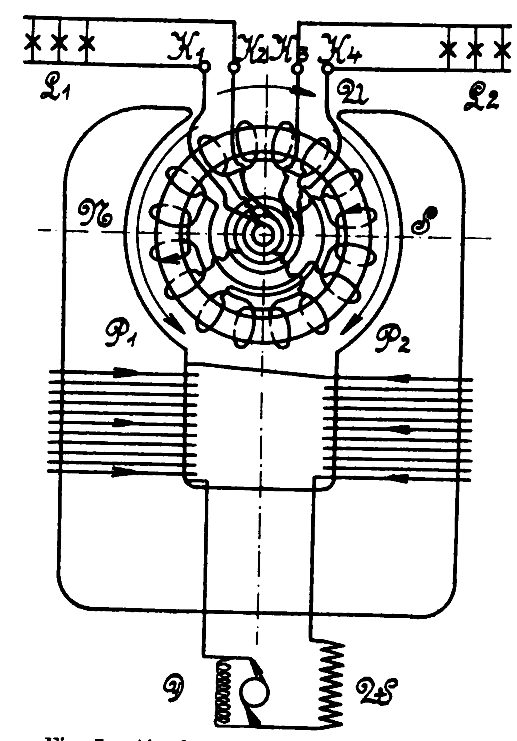


Fig. 7. Abnahme von Zweiphasenstrom.

jedem Spulenpaare an den zugehörigen Schleifringen beziehungsweise Bürsten je einen Wechselstrom entnehmen. Man erhält demnach aus einer solchen Maschine zwei Wechselströme und nennt sie daher eine Zweiphasenmaschine oder eine zweiphasige Wechselstrommaschine. Man kann die beiden Wechselströme auch miteinander verketten, indem man die beiden Anfänge der Spulenpaare zu einem Schleifringe und die beiden Enden zu zwei anderen Schleifringen führt. Dann erhält die Zweiphasenmaschine nur drei Schleifringe. Die beiden Wechselströme haben zu gleicher

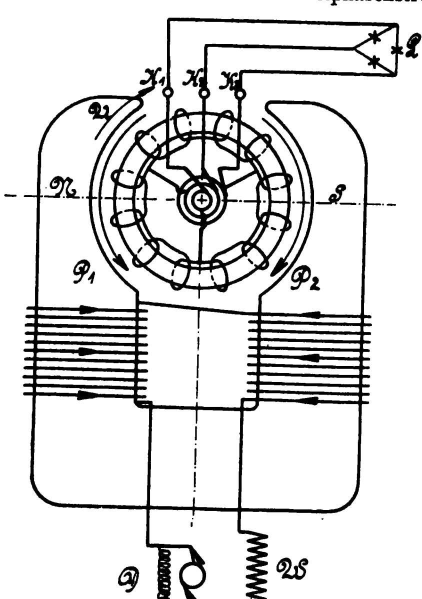


Fig. 8. Abnahme von Dreiphasenstrom. Dreieckschaltung.

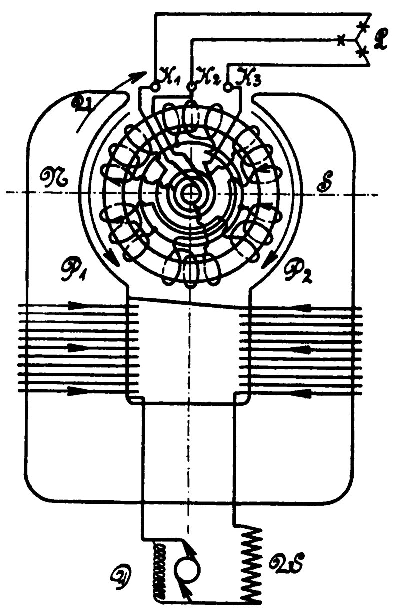


Fig. 9. Abnahme von Dreiphasenstrom. Sternschaltung.

Zeit verschiedene Stärke, sie befinden sich in verschiedenem Schwingungszustande oder in verschiedener Phase; man nennt sie deshalb auch Wechselströme verschiedener Phase oder Mehrphasenströme.

Nimmt man nach dem Schema, Fig. 8, von drei gleich weit voneinander abstehenden Punkten eines Ankers Strom vermittels dreier Schleifringe ab, so erhält man drei Wechselströme, und zwar je einen Wechselstrom zwischen den Klemmen $K_1 K_2$, $K_2 K_3$ und $K_1 K_3$ und man kann bei L drei Lampengruppen einschalten. Die in Fig. 8 für Anker und Lampengruppen durchgeführte Schaltung (Verkettung) nennt man Dreieckschaltung.

Ähnlich so wie bei Zweiphasenstrom, Fig. 7, kann man auch bei Dreiphasenstrom die Ankerwicklung in Spulenpaare gruppieren. Bei Zweiphasenstrom muß man zwei, bei Dreiphasenstrom drei Spulenpaare, Fig. 9, wählen. Die in der letzten Figur wiedergegebene Schaltung des Ankers und der Lampengruppen nennt man Sternschaltung.

2. Methoden. Die Wechselstromprobleme werden sowohl nach der analytischen Methode (Rechnung) als auch nach der graphischen Methode (Zeichnung) gelöst. In dieser Arbeit wird vorwiegend der letztere Weg betreten. Analytisch soll z. B. die Gleichung der Wellenlinie des näheren Erläuterung finden, weil diese Gleichung wesentlich zum Verständnisse der Wechselströme beiträgt. Die zumeist angewendeten graphischen Methoden sind die folgenden:

1. Polarkoordinatensystem (Polardiagramm) mit der Zeit als Winkel oder Amplitude, augenblicklichen Werten der Funktionen als Radienvektoren, ohne Anwendung von trigonometrischen Funktionen mit Zuhülfenahme von komplexen Größen.[1])

2. Polardiagramm (Zeuner-Diagramm der Schiebersteuerung) mit einem[2]) und mit zwei Kreisen.

3. Vektordiagramm nach Thomas H. Blakesley, Gisbert Kapp, Frederick Bedell, C. Crehore u. a.

4. Wellendiagramm.

Hier sollen nur die letzten drei graphischen Darstellungen Verwendung finden. Die ersten drei Methoden stimmen wesentlich miteinander überein.

---

[1]) Chas. Proteus Steinmetz. Elektrotechnische Zeitschrift, 1893, S. 597, 613, 641, 653 ff.

[2]) Gisbert Kapp. Elektrische Wechselströme, 1897.

Chas. Proteus Steinmetz. Elektrotechnische Zeitschrift, 1890, S. 185 und 189, S. 394 ff.

A. Blondel. La lumière électrique, 1892, S. 351.

3. Das einfache Sinusgesetz. In Fig. 10 ist die Anordnung einer Dynamomaschine angedeutet. Die Umdrehungsrichtung gibt der Pfeil *U* wieder. Der Anker wurde, der Einfachheit der Darstellung halber, nur mit vier Windungen beziehungsweise Spulen *I*, *II*, *III* und *IV* versehen.

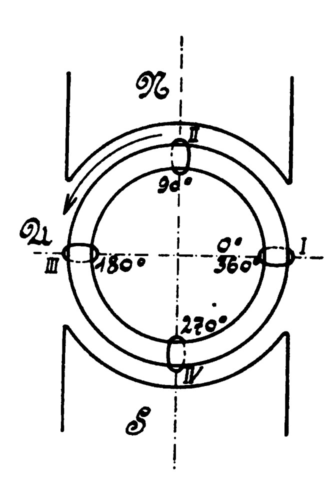


Fig. 10. Anker zwischen den Polen *N* und *S*.

Der Verlauf der induzierten elektromotorischen Kraft in den einzelnen Lagen einer solchen Windung während einer Umdrehung derselben ist der folgende:

1. In der Stellung *I*, Fig. 10, (Neutrale Zone) hat die *E M K* (Elektromotorische Kraft) den Wert 0, entsprechend dem Punkte a_1, Fig. 11.

2. In den zwischen *I* und *II*, Fig. 10, gelegenen Stellungen wächst die *EMK* von 0 auf ihren größten Wert.

3. In der Stellung *II*, Fig. 10, erreicht die *E M K* den größten Wert $e_1\, e = + a$, Fig. 11.

4. In den Stellungen zwischen *II* und *III*, Fig. 10, sinkt die *EMK* von ihrem größten Wert bis auf den Wert 0.

5. In der Stellung *III*, Fig. 10, ist der Wert der *EMK* gleich 0 und wechselt seine Richtung f_1, Fig. 11.

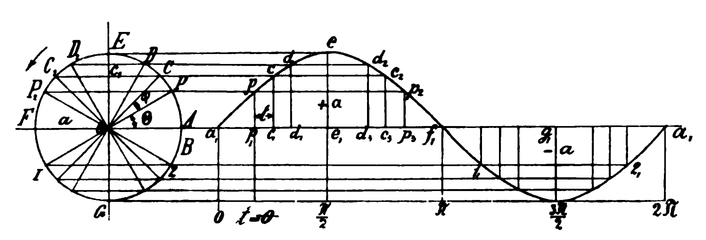


Fig. 11. Zeichnung der Wellenlinie.

6. In den Stellungen zwischen *III* und *IV*, Fig. 10, steigt die *EMK* von 0 auf ihren größten Wert.

7. In der Stellung *IV*, Fig. 10, erlangt die *EMK* ihren größten Wert $g_1 = \frac{3\pi}{2} = -a$, Fig. 11.

8. In den Stellungen zwischen *IV* und *I*, Fig. 10, sinkt die *EMK* von ihrem größten Wert auf den Wert 0.

9. In der Stellung *I*, Fig. 10, ist die *EMK* wieder gleich 0 und wechselt ihre Richtung in $a_1 = 2\pi$, Fig. 11.

Tragen wir demnach, Fig. 11, diese einzelnen Werte der induzierten *EMK* als Ordinaten auf einer ebenso wie den Umfang des Ankers in 360° in 360 Teile geteilt gedachten Geraden, der Abszissenachse, auf und verbinden die Endpunkte derselben durch eine krumme Linie (Kurve), so gibt dieses Bild den Verlauf der Induktion in einer Spule in den verschiedenen Lagen einer Windung während einer Umdrehung in einer Zeichnung (graphisch) wieder. Eine solche krumme Linie heißt man eine Wellenlinie (Sinuslinie, Sinuskurve, Sinusfunktion, periodische oder harmonische Funktion).

Die verschiedenen + (oberhalb der Geraden gelegenen) und — (unterhalb der Geraden gelegenen) Werte von 0° bis 360°, Fig. 11, umfassen eine Periode des Wechselstromes. Eine Periode ist gleich zwei Stromwechseln. Die Anzahl der Stromwechsel in den Induktorwindungen ist gleich der Anzahl der Polwechsel (dem Zyklus) im Induktoreisen. Die Anzahl der Perioden in der Sekunde heißt die Frequenz. Unter Phase der *EMK* (beziehungsweise Stromstärke) versteht man die Richtung (+ oder —), die Geschwindigkeit und die Größe derselben an irgend einer Stelle ihres Verlaufes. Die Zeit, die bis zum Eintritte einer gewissen Phase verfließt, heißt Phasenzeit. Die Verzögerung einer Strom- oder einer Spannungswelle gegen eine andere oder von Strom- oder Spannungswellen gegeneinander bezeichnet man als Phasendifferenz (Phasenverschiebung). Wechselströme, welche gleiche Wechselzahl und Wellenlänge haben, nennt man Wechselströme von gleichem Rhythmus; solche Ströme werden z. B. in den sekundären Windungen eines Transformators induziert. Die Amplitude der Schwingungen ist der größte Wert der Spannung (beziehungsweise Stromstärke) innerhalb einer halben Periode.

In der Algebra und Analysis der Vektoren versteht man unter Vektor eine Größe, welcher eine Richtung, ein bestimmter Sinn und eine bestimmte Stärke im Raume zukommt. Vektoren sind z. B.: Kräfte, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen. Größen, welchen keine Richtung im Raume zukommt, heißen Skalaren; solche Größen sind: Temperatur, Masse, Widerstand, Arbeit, magnetische Kraft, Drehbewegungen um Achsen. Die Vektoren lassen sich durch Strecken, die Skalaren durch Zahlen darstellen. Zur Ausmessung der Strecken bedient man sich des Maßstabes. Die einzelnen Punkte der Sinuslinie entsprechen den verschiedenen Sinuswerten in einem Kreise, dessen Radius gleich der Amplitude der Sinuslinie ist. Daher sind die einzelnen elektromotorischen Kräfte beziehungsweise Stromstärken dem Sinus des Winkels proportional, welchen die betreffende Spule mit der Nullstellung derselben (Stellung *I*) einnimmt, d. h.: $E = a \, . \, sin\, \Theta$.

Der Winkel Θ stellt demnach in dieser Formel den Weg vor, welchen die betreffende Spule zurückgelegt hat. Die letzte Gleichung gilt für jeden Punkt der Wellenlinie, Fig. 11, also beispielsweise auch für den Punkt p derselben. Denken wir uns $p\,p_1$ parallel verschoben, bis p mit P zusammenfällt, dann entsteht ein rechtwinkliges Dreieck, $O\,p\,p_1$, so daß $\frac{p\,p_1}{O\,P} = \sin\Theta$ oder $p\,p_1 = O\,P \,.\, \sin\Theta$ und für $O\,P = a$ und $p\,p_1 = E$ gesetzt, erhalten wir die allgemeine Form der Sinusgleichung: $E = a\,.\,\sin\Theta$, wie oben.

Es sei hervorgehoben, daß der Verlauf der elektromotorischen Kraft beziehungsweise Stromstärke nicht ein rein periodischer (harmonischer) ist, welcher dem Gesetze der einfachen Schwingungen, dem Sinusgesetze folgt. Dieser Verlauf trifft nach Joubert für die alten Wechselstrommaschinen der Siemens & Halske A.-G., welche im Anker kein Eisen besitzen, beiläufig zu, wird bei der Behandlung der Wechselstromprobleme als zulässig erklärt und führt zu praktisch brauchbaren Ergebnissen. Tatsächlich weichen die Spannungs- und Stromlinien sowie die Linien für das harmonische magnetische Feld bedeutend von der Form der Sinuslinie ab.

Wir bezeichnen in der Folge mit T die Zeitdauer einer Periode, mit $\frac{T}{2}$ die Wechselzeit. In dem zunächst Folgenden wählen wir A, Fig. 11, als Anfangspunkt der Zeit t, während in dieser Figur tatsächlich P als Anfangspunkt der Zeit angenommen wurde.

In der Zeit $t = T$ wird jede Spule den Weg 2π zurücklegen.
" " " $t = \frac{T}{2}$ " " " " " π "
" " " $t = \frac{T}{4}$ " " " " " $\frac{\pi}{2}$ "
" " " $t = 0$ " " " " " 0 "
" " " $t = t$ " " " " " Θ "

$\Theta = \frac{2\pi t}{T}$, denn führen wir in $\Theta = \frac{2\pi t}{T}$ die einzelnen Werte

$t = T \qquad t = \frac{T}{2} \qquad t = \frac{T}{4} \qquad t = 0 \qquad t = t$

ein, so erhalten wir

$$\Theta = \frac{2\pi\,T}{T} = 2\pi,\ \Theta = \frac{2\pi\frac{T}{2}}{T} = \pi,\ \Theta = \frac{2\pi\frac{T}{4}}{T} = \frac{\pi}{2},\ \Theta = \frac{2\pi 0}{T} = 0,\ \Theta = \frac{2\pi t}{T}.$$

Setzen wir diesen Wert für Θ in die obige Gleichung

$$E = a\,.\,\sin\Theta$$

ein, so übergeht dieselbe in die folgende:

$$E = a \,.\, sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Die elektromotorischen Kräfte beziehungsweise Stromstärken in den verschiedenen Stellungen der Spulen müssen dieser Gleichung Genüge leisten.

Für $t = 0$ ist $E = a \,.\, sin\, 0 = 0.$

„ $t = \frac{T}{2}$ „ $E = a \,.\, sin\, \pi = 0.$

„ $t = T$ „ $E = a \,.\, sin\, 2\pi = 0.$

„ $t = \frac{3T}{2}$ „ $E = a \,.\, sin\, 3\pi = 0.$

. . . .

Für $t = \frac{T}{4}$ ist $E = a \,.\, sin \frac{\pi}{2} = a.$

„ $t = \frac{3T}{4}$ „ $E = a \,.\, sin \frac{3\pi}{2} = a.$

„ $t = \frac{5T}{4}$ „ $E = a \,.\, sin \frac{5\pi}{2} = a \,.\, sin\, 450^0 = a.$

Die elektromotorische Kraft beziehungsweise Stromstärke erreicht demnach für den Wert a ihren größten Wert (Maximum), denn für $E = a$ muß in der Formel $E = a \,.\, sin \frac{2\pi t}{T}$, $sin \frac{2\pi t}{T} = 1$ sein und 1 ist der größte Wert, welchen ein Sinus erreichen kann.

In der Gleichung $E = a \,.\, sin \frac{2\pi t}{T}$ bedeutet t die Zeitdauer der ganzen Bewegung und $\frac{t}{T}$ die Anzahl der Perioden. Wenn der Vektor $\overline{OA}$, Fig. 11, einen Kreis beschreibt (eine Umdrehung von O als Drehpunkt ausführt), so legt er den Weg $2\pi r$ zurück. Wir können r jeden beliebigen Wert beilegen. Setzen wir $r = 1$, so ist der Weg $2\pi r = 2\pi$. Während der Vektor $\overline{OA}$ eine Umdrehung vollführt, hat der Wechselstrom eine Periode zurückgelegt. Der in einer Sekunde von dem Vektor zurückgelegte Weg muß demnach $\frac{2\pi}{T}$ sein; den Weg aber, welchen ein Punkt am Halbmesser 1 bei einer gleichförmigen Bewegung in 1 Sekunde zurückgelegt, nennt man Winkelgeschwindigkeit und bezeichnet dieselbe mit dem Buchstaben ω, d. h.:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Da T die Zeitdauer einer Periode bedeutet, werden in 1 Sekunde $\frac{1}{T}$ Perioden der harmonischen Funktion oder Umdrehungen des Vektors erfolgen. Wir wollen $\frac{1}{T}$ mit $\sim$ bezeichnen. Bei einer zweipoligen Dynamo entsprechen n-Umdrehungen in der Sekunde n-Perioden, bei einer vierpoligen dagegen 2 n-Perioden. Für die zweipolige Dynamo ist daher $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi n$, für die vierpolige

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \,.\, 2n = 4\pi n.$$

Führt man anstatt der Umdrehungszahl n bezw. $2n$ bei der vierpoligen Maschine die Periodenzahl $\sim$ ein, so erhält man für die zweipolige Dynamo für ω anstatt $\omega = 2\pi n$ den Wert $\omega = 2\pi \sim$, für die vierpolige Dynamo für ω anstatt $\omega = 4\pi n$ den Wert $\omega = 2\pi \sim$, d. h. allgemein für eine beliebig polige Dynamo $\omega = 2\pi \sim$. Der Punkt C, Fig. 11, hat demnach am Umfange eine gleichförmige Geschwindigkeit und seine Projektion auf den senkrechten Durchmesser $\overline{OE}$, also C_1 bewegt sich harmonisch. Dasselbe gilt von der Projektion des Halbmessers $\overline{OC}$ auf den durch O gezogenen senkrechten Durchmesser. Den Höchstwert dieser Projektion nennt man die Amplitude (Halbmesser des betreffenden Kreises). Die Projektion von $\overline{OC}$ ist gleich $\overline{OC_1}$.

Befindet sich $\overline{OC}$ in der Lage $\overline{OA}$, dann ist die Projektion von $\overline{OC}$ (jetzt $\overline{OA}$) auf den senkrechten Durchmesser $= 0$. Kommt $\overline{OC}$ nach $\overline{OE}$, so ist die Projektion von $\overline{OC}$ (jetzt $\overline{OE}$) auf den senkrechten Durchmesser $= \overline{OE}$. Diese Projektionen des Vektors $\overline{OC}$ haben demnach in den Stellungen $\overline{OA}$ und $\overline{OF}$ den Wert 0, in der Stellung $\overline{OE}$ den positiven und in der Stellung $\overline{OG}$ den negativen Höchstwert (Maximalwert). Wir können demnach harmonisch sich verändernde Größen durch eine Gerade $\overline{OA}$, Fig. 11, und durch deren Drehungsrichtung (den Pfeil in derselben Figur) darstellen. Obige Projektionen nehmen nach einer bestimmten Zeit immer wieder dieselbe Größe an, man nennt sie deshalb periodische Größen und die Bewegungen periodische Bewegungen. Solche Bewegungen zeigen z. B. Himmelskörper, Wasserteilchen im Meere, Kreuzkopf einer Dampfmaschine, elektromotorische Kraft, Stromstärke und harmonisch magnetische Felder.

Betrachten wir den Punkt A, Fig. 11, als den Anfangspunkt der Zeit und bezeichnen die Projektion von $\overline{OP}$ auf $\overline{EG}$ zu einer beliebigen Zeit mit y, so ist $y = a \sin \Theta = a \sin \omega t$.

Nehmen wir P, Fig. 11, als Anfangspunkt der Zeit an, so nennt man $\Theta =$ den Epochenwinkel, die zur Zurücklegung dieses Winkels erforderliche Zeit $a_1\, p_1$ Epoche und es gilt die Gleichung

$$y = a \sin(\varphi + \Theta) = a \sin(\omega t + \Theta),$$

dann hat Θ einen positiven Wert und heißt Vorsprungs- oder Vorauswinkel. Nimmt man dagegen B als Anfangspunkt der Zeit an, so heißt dieser Winkel Θ Verzögerungswinkel. Mit P als Anfangspunkt der Zeit gelten daher die folgenden Bezeichnungen:

$\sphericalangle A\,O\,P = \Theta$ Epochenwinkel.
$a_1\, p_1 =$ Epoche (Zeitabschnitt).
$O\,A = O\,E = a =$ Amplitude.
$\sphericalangle P\,O\,C = \varphi = \omega\, t =$ In der Zeit t zurückgelegter Winkel.
$\varphi + \Theta =$ Phasenwinkel.
$t + a_1\, p_1 =$ Phase.
$O\,P =$ Vektor.
$t =$ Zeit.

Übersichtliche Zusammenstellung über das Sinusgesetz.

$t =$ Zeitdauer der ganzen Bewegung	$\Theta = \frac{2\pi t}{T} =$ Weg jed. Spule	$E = a \sin \Theta$
0	0	0
$\frac{1}{4} T$	$\frac{\pi}{2}$	a
$\frac{1}{2} T$	π	0
$\frac{3}{4} T$	$3 \frac{\pi}{2}$	$-a$
T	2π	0
$\frac{5}{4} T$	$5 \frac{\pi}{2}$	a
t	$\frac{2\pi t}{T}$	$a \sin \frac{2\pi t}{T}$

4. Addition zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase. (Vektordiagramm.) Die EMK z. B. sind durch ihre Höchstwerte $O\,A$ und $O\,B$, Fig. 12, gegeben und befolgen das Sinusgesetz. Der augenblickliche Wert von $O\,A$ ist die Projektion von $O\,A$ auf die Senkrechte. Das folgt ohneweiters aus dem Zusammenhange zwischen dem Vektor- und dem Wellendiagramme, Fig. 11. Der Vektor $O\,A$ stellt den Höchst-

wert, seine Projektionen in den verschiedenen Stellungen dagegen während seiner Drehung um 360° die augenblicklichen Werte der *EMK* dar. Ebenso muß der augenblickliche Wert von $OB = OB_1$ sein. Für die Summe der augenblicklichen Werte gilt demnach die Beziehung:

$$OA_1 + OB_1 \doteq OC_1.$$

Diese Gleichung folgt sofort aus Fig. 11 durch Abmessung der Strecken. Die augenblicklichen Werte hängen also mit den Höchstwerten so zusammen, dass die Projektion eines Höchstwertes den augenblicklichen Wert gibt. Dasselbe gilt für die Summe zweier augenblicklicher oder Höchstwerte. Zeichnet man das Parallelogramm $OACB$, so findet man, dass die Projektion OC_1 gleich ist der Projektion der

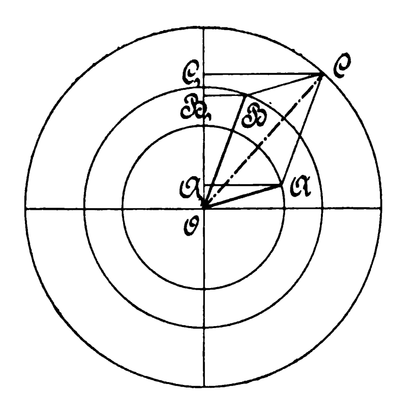


Fig. 12. Vektordiagramm der Summation zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

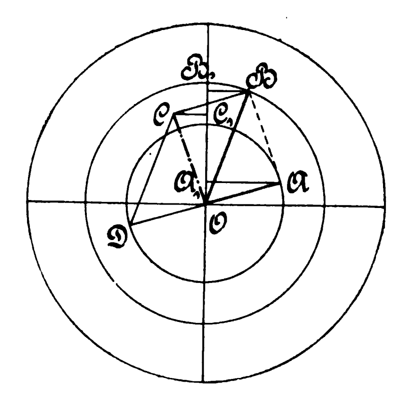


Fig. 13. Vektordiagramm der Subtraktion zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

Diagonale OC des Parallelogrammes auf die Senkrechte. Daraus folgt der Satz:

Bilden zwei Höchstwerte zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase miteinander einen Winkel und man konstruiert aus diesen beiden Größen ein Parallelogramm, so ist die Diagonale dieses Parallelogrammes gleich der Summe dieser beiden Größen.

5. Subtraktion zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase. (Vektordiagramm.) Zwei *EMK*, Stromstärken u. s. w. z. B. sind durch ihre Höchstwerte

OA und OB, Fig. 13, gegeben und befolgen das Sinusgesetz. Subtrahiert man die augenblicklichen Werte, so erhält man

$$OB_1 - OA_1 = A_1 B_1,$$

worin $A_1 B_1$ = Projektion der Diagonale AB. Es ist demnach AB die Differenz zwischen OA und OB und es folgt der Satz:

Bilden zwei Höchstwerte zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase miteinander einen Winkel und man konstruiert aus diesen beiden Größen ein Parallelogramm, so ist die diesem Winkel gegenüberliegende Diagonale des Parallelogrammes gleich der Differenz der beiden Größen.

OC haben wir dadurch erhalten, dass wir OA über O verlängerten und $OA = OD$ zeichneten. Ist OA positiv, so muß OD negativ sein und wir haben demnach die Subtraktion $OB - OA$ in eine Addition $OB + (-A)$ verwandelt. Jetzt erscheint die Differenz OC als Radiusvektor.

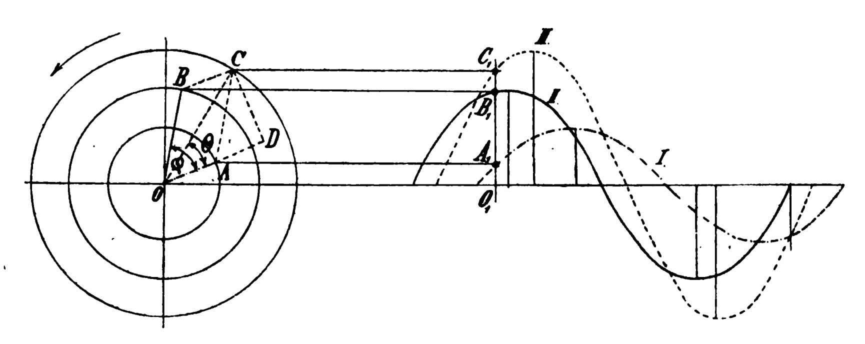


Fig. 14. Vektor- und Wellendiagramm der Summation zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

6. Summation zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase. (Vektor- und Wellendiagramm.)

In Fig. 14 stellen $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$ die Höchstwerte zweier periodisch veränderlicher Größen vor. Gerade so wie bei Kräften, Bewegungen u. s. w., kann man auch hier das Parallelogramm $OACB$ einzeichnen, so daß $\overline{OC}$ die Resultierende der Größen $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$ wiedergibt. Die Figur 14 stellt demnach links ein Vektor-, rechts ein Wellendiagramm zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase dar. Zwei solche Größen sind in der Figur 14 rechts

durch die Kurven *I* und *II* gegeben; wir wollen es nachweisen, daß die Kurve *III* die Summe der Kurven *I* und *II* veranschaulicht. Errichtet man an irgend einer Stelle des Wellendiagrammes, z. B. im Punkte O_1, eine Senkrechte, dann ist $\overline{O_1\,C_1} = \overline{O_1\,A_1} + \overline{O_1\,B_1}$, wobei $\overline{O_1\,A_1} = \overline{B_1\,C_1}$. Man kann diese Summation leicht mit Hülfe eines Zirkels oder eines Maßstabes ausführen. In Fig. 14 ist $\overline{O_1\,C_1} = 15{\cdot}2$ *mm*, $\overline{O_1\,B_1} = 12{\cdot}5$ *mm*, $\overline{O_1\,A_1} = \overline{B_1\,C_1} = 2{\cdot}7$ *mm*. Setzen wir diese Werte in die Gleichung $\overline{O_1\,C_1} = \overline{O_1\,A_1} + \overline{O_1\,B_1}$ ein, so erhalten wir

$$15{\cdot}2 = 12{\cdot}5 + 2{\cdot}7.$$

Anstatt *mm* können wir auch Ampère oder Volt einsetzen, indem wir z. B. 1 Ampère für eine Länge von 1 *mm* annehmen. Damit haben wir den Punkt C_1 der Summenkurve *III* bestimmt; auf dieselbe Art findet man sämtliche Punkte dieser Kurve. Das Vektordiagramm, linker Teil der Figur 14, zeigt die folgenden Abmessungen:

Radius des innersten Kreises oder Amplitude der Linie *I* $= 7{\cdot}5$ *mm*
„ „ mittleren „ „ „ „ „ *II* $= 12{\cdot}7$ *mm*
„ „ äußeren „ „ „ „ „ *III* $= 17{\cdot}6$ *mm*

Die Vektoren $\overline{O\,A}$ und $\overline{O\,B}$ ergeben demnach als Resultierende den Vektor $\overline{O\,C} = 17{\cdot}6$ *mm*. Ebenso erhält man im Wellendiagramme, rechter Theil der Figur 14, die Amplitude 17·6 *mm* als Amplitude der Summenlinie *III*. Dreht man das Parallelogramm $O\,A\,C\,B$ um den Punkt O, so geben die Projektionen der Vektoren $\overline{O\,A}$, $\overline{O\,B}$ und $\overline{O\,C}$ auf den durch O gezogenen, senkrechten Durchmesser die Werte der veränderlichen Größen *I*, *II* und *III* zu den verschiedenen Zeiten der Bewegung an. Anstatt auf den senkrechten Durchmesser der konzentrischen Kreise kann man die Vektoren $\overline{O\,A}$, $\overline{O\,B}$ und $\overline{O\,C}$ auch auf die senkrechte Gerade $O_1\,A_1\,B_1\,C_1$ projizieren und erhält dann

$\overline{O_1\,A_1}$ als Projektion von $\overline{O\,A}$, $\overline{O_1\,B_1}$ als Projektion von $\overline{O\,B}$ und $\overline{O_1\,C_1}$ als Projektion von $\overline{O\,C}$. Nach dem Carnotschen Satze (Projektionssatze)[1]) ist, Fig. 14:

$$\overline{O\,C} = \sqrt{\overline{O\,A}^2 + \overline{O\,B}^2 + 2\,\overline{O\,A}\;\overline{O\,B}\cos\varphi};$$

aus derselben Figur folgt:

$$tg\;C\,O\,D = tg\;\Theta = \frac{\overline{C\,D}}{\overline{D\,O}} = \frac{\overline{O\,B}\sin\varphi}{\overline{O\,A} + \overline{O\,B}\cos\varphi}.$$

Aus diesen beiden Formeln kann man zunächst $\overline{O\,C}$ und Θ berechnen.

[1]) Das Quadrat einer Dreiecksseite wird auch gefunden, wenn man die Quadrate der beiden anderen Seiten addiert und um das doppelte Produkt dieser Seiten mit dem Cosinus des von ihnen gebildeten Außenwinkels vermehrt.

7. Subtraktion zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase. (Vektor- und Wellendiagramm, Fig. 15.) In der Figur stellen $\overline{OB}$ und $\overline{OA}$ die Höchstwerte zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase vor. Gerade so wie bei Kräften, Bewegungen u. s. w., kann man auch hier die eine der beiden Komponenten $\overline{OB}$ und $\overline{OA}$, z. B. $\overline{OA}$ (wenn die Differenz $\overline{OB}-\overline{OA}$ gebildet werden soll) über den Mittelpunkt O hinaus verlängern und das Kräfteparallelogramm zeichnen. $\overline{OC}$ ist dann die resultierende Differenz der Größen $\overline{OB}-\overline{OA}$, d. h. $\overline{OB}-\overline{OA}=\overline{OC}$. Die Figur 15 veranschaulicht links ein Vektor-, rechts ein Wellendiagramm zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase. Zwei solche Größen sind in derselben Figur rechts durch die Wellenlinien *II* und *I* gegeben. Wir wollen nachweisen, daß die Wellenlinie

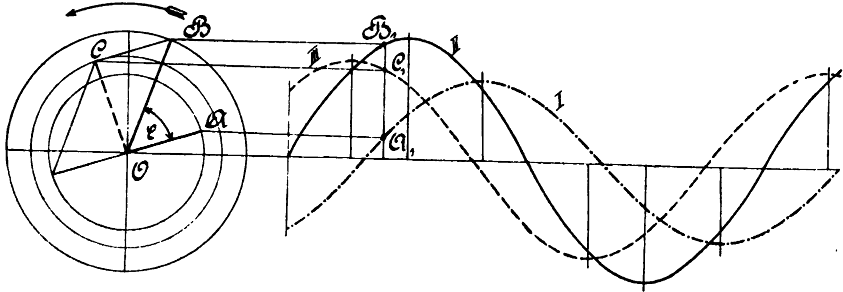


Fig. 15. **Vektor-Wellendiagramm zweier periodisch veränderlicher Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase.**

III die Differenz der Wellenlinien *II* und *I* ist, d. h. *II*—*I* = *III*. Errichtet man an irgend einer Stelle des Wellendiagrammes, z. B. in dem Punkte A_1, eine Senkrechte, dann folgt: Ordinate des Punktes B_1 weniger Ordinate des Punktes A_1 = Ordinate des Punktes C_1. So haben wir den Punkt C_1 der Differenzlinie *III* erhalten. Die letztere Differenz kann man leicht mit Hülfe eines Zirkels oder Maßstabes finden. In Fig. 15 ist die Ordinate des Punktes $B_1 = 15\,mm$, die Ordinate des Punktes $A_1 = 3\,mm$. Somit ergeben sich als Ordinate des Punktes $C_1 =$ $= 15-3 = 12\,mm$. Anstatt *mm* können wir auch Ampère, Volt u. s. w. einführen, indem wir z. B. 1 Volt = 1 *mm* annehmen. Damit haben wir den Punkt C_1 des Wellendiagrammes bestimmt. Ebenso ergeben sich sämtliche Punkte der Wellenlinie *III*. Das Vektordiagramm, linker Teil der Figur 15, zeigt die folgenden Abmessungen:

Radius des innersten Kreises oder Amplitude der Linie *I* = 10·5 *mm*
" " mittleren " " " " " *III* = 13 *mm*
" " äußersten " " " " " *II* = 16 *mm*

Die Vektoren $\overline{OB} = 16\,mm$ und $\overline{OA} = 10{\cdot}5\,mm$ ergeben demnach als Differenz die Resultierende $\overline{OC} = 13\,mm$. In derselben Weise erhält man im Wellendiagramm, rechter Teil der Figur 15, die Amplitude der Differenzlinie $III = 13\,mm$. Dreht man $\overline{OA}$, $\overline{OB}$ und $\overline{OC}$ um den Punkt O, so ergeben die Projektionen von $\overline{OA}$, $\overline{OB}$ und $\overline{OC}$ auf den durch O gezogenen senkrechten Durchmesser die jeweiligen augenblicklichen Werte der Wellenlinien I, II und III zu den verschiedenen Zeiten der Bewegung an. In dem Augenblicke, welchem die Figur 15 entspricht, sind die zugehörigen Punkte zu A, B und C im Vektordiagramm, die Punkte A_1, B_1 und C_1 im Wellendiagramm. Die in dieser Figur gezeichneten Projektionslinien BB_1, CC_1 und AA_1 haben den Zweck, den Zusammenhang des Vektordiagrammes mit dem Wellendiagramme deutlich zu veranschaulichen, ähnlich so wie es unter 6 bereits erörtert wurde.

8. Zusammensetzung mehrerer periodischer Größen von gleicher Periode und verschiedenen Phasen.

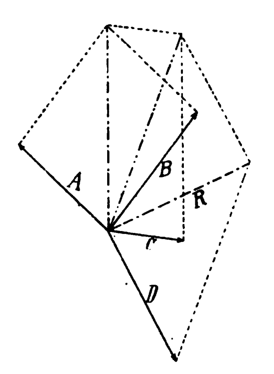


Fig. 16. Zusammensetzung mehrerer periodischer Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

Sind mehr als zwei Vektoren (Komponenten) vorhanden, so erhält man die Resultierende ebenso wie bei Kräften durch Parallelogramme. Den Punkt, in welchem A, B, C und D, Fig. 16, zusammenstoßen, nennt man Ursprung. Um die Resultierende R zu finden, errichten wir zunächst über den Komponenten A und B ein Parallelogramm; so erhalten wir die Resultierende (in der Figur strichpunktiert). Setzen wir die erste Resultierende mit C zusammen, so ergibt sich die zweite Resultierende (in der Figur strichpunktiert). Zeichnen wir über der zweiten Resultierenden und über D das Parallelogramm, dann erhalten wir die dritte Resultierende, die Resultierende R des ganzen Systems.

Eine einfachere Konstruktion der Resultierenden R erscheint in Fig. 17 durchgeführt. Man trägt vom Ursprunge aus der Richtung nach parallel zu A, Fig. 16, die Strecke A, Fig. 17, von gleicher Länge auf, zieht vom Endpunkte der Strecke A, Fig. 17, eine Parallele zu B, Fig. 16, macht B, Fig. 17, so groß als B, Fig. 16, zieht vom Ende B, Fig. 17, eine Parallele zu C, Fig. 16, macht diese so groß als C, Fig. 16, und zieht schließlich von dem Ende von C, Fig. 17, eine Parallele D, Fig. 17, zu D, Fig. 16, und macht diese mit D,

Fig. 16, gleich lang. Die Verbindungslinie des Ursprunges mit dem Endpunkte von D, Fig. 17, gibt die Resultierende R des Systems.

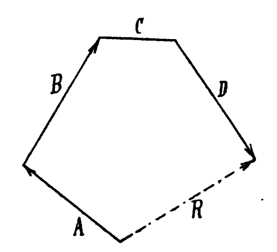


Fig. 17. Zusammensetzung mehrerer periodischer Größen von gleicher Periode und verschiedener Phase.

In der Figur 17 ist $A = 16$ *mm*, $B = 20$ *mm*, $C = 10$ *mm*, $D = 19$ *mm* und $R = 21$ *mm*. Haben wir Stromkurven zusammenzusetzen, dann wählen wir für 1 Ampère 1 *mm* oder 1 *cm* oder eine andere beliebige Anzahl von *mm* oder *cm*, je nach der Größe der gewünschten Figur; dann erhalten wir die Resultierende in Ampère.

9. Gleichstrom-Wechselstrom. Aus den Figuren 5 und 6 ist es ersichtlich, daß der in geschlossenen Drahtwindungen erzeugte Strom seine Richtung wechselt, somit Wechselstrom sein muß.

In jedem Induktor wird Wechselstrom erzeugt.

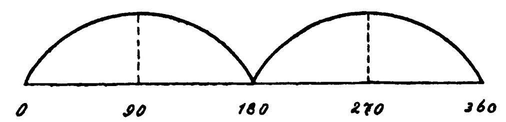


Fig. 18. Gleichstrom. Zwei Kollektorlamellen.

Bringt man jedoch einen Kollektor in Anwendung, so werden die elektromotorischen Kräfte, Fig. 1 und 2, durch denselben gleichgerichtet. Der Verlauf eines Gleichstromes ist demnach durch die in Fig. 18 wiedergegebene krumme Linie veranschaulicht. Dieses Bild entspricht zwei Kollektorlamellen.

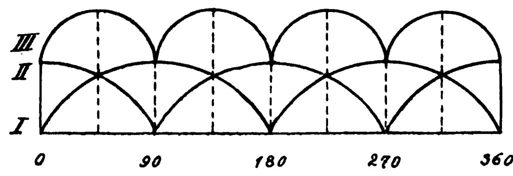


Fig. 19. Gleichstrom. Vier Kollektorlamellen.

Besteht der Kollektor aus zwei Lamellen, so gibt es zwei Punkte, 0^0 und 180^0, in welchen die elektromotorische Kraft gleich Null ist, und zwei Punkte, 90^0 und 270^0, in welchen die elektromotorische Kraft einen größten Wert (ein Maximum) erreicht.

Sind vier Kollektorlamellen vorhanden, so ergibt sich, Fig. 19, für das erste Lamellenpaar die Kurve *I*, für das zweite Lamellenpaar die Kurve *II* und durch das Summieren der Werte der elektromotorischen Kräfte der beiden Lamellenpaare die Kurve *III*. Die resultierende

Kurve *III* hat viermal den Wert Null und viermal einen größten Wert; die einzelnen Schwankungen werden deshalb geringer sein, als wenn nur ein Lamellenpaar vorhanden wäre. Es folgt daraus die Regel:

Je größer die Anzahl der Kollektorlamellen ist, desto geringer sind die Änderungen in der elektromotorischen Kraft und in der durch sie hervorgerufenen Stromstärke.

Die Anzahl der Kollektorlamellen wird dadurch eingeschränkt, daß die Kosten des Kollektors mit der Anzahl derselben steigen.

10. Bestimmung der induzierten elektromotorischen Kraft beziehungsweise der wahren Stromstärke in irgend einer bestimmten Phase der Bewegung nach Joubert.

Die Versuchsmaschine war eine Wechselstrommaschine nach Siemens & Halske, deren Induktorspulen kein Eisen enthielten.

Fig. 20 gibt die Versuchsanordnung wieder.

Fig. 20. Vorrichtung von Joubert.

Auf der Welle einer Wechselstrommaschine sind die Kupferscheibe S_1 und eine Scheibe S_2 aus einem Nichtleiter mit einem Metallkontakte aufgekeilt. In der Figur 20 stellt der lichte Streifen auf der schwarzen Scheibe S_2 den Metallkontakt dar. Auf den Scheiben schleifen die Bürsten b_1 und b_2. Die Bürste b_2 ist mit der einen Klemme K_1 der Wechselstrommaschine verbunden. An die verstellbare Bürste b_1 war unter Zwischenschaltung eines Galvanometers G die Klemme K_2 der Wechselstrommaschine angeschlossen. Da die Bürste b_1 verstellbar ist, kann das Instrument G die Spannung in ganz bestimmten Lagen der Induktorspulen gegen das magnetische Feld (in bestimmten Phasen der Bewegung) messen. Während jeder Umdrehung in einer bestimmten Stellung der Bürste b_1 erhält das Galvanometer G Strom von derselben Phase. Erfolgen die Umdrehungen sehr rasch aufeinander, dann gibt das Galvanometer G eine beständige Ablenkung, entsprechend der elektromotorischen Kraft an dieser Stelle. Verschiebt man die Bürste b_1 auf dem ganzen Umfange der Scheibe S_2 und liest die einzelnen Ablenkungen am Galvanometer G ab, so stellen dieselben die elektromotorischen Kräfte in den verschiedenen Phasen der Bewegung dar. Zu beachten ist, daß die Kontaktstelle von Übergangswiderständen frei sein muss. Gute Dienste leistet die Einschaltung eines Kondensators,

welcher durch das Galvanometer G entladen wird. Schaltet man den Joubertschen Apparat und einen induktionsfreien Normalwiderstand, in welchem sich ein Galvanometer befindet, in den äußeren Stromkreis ein, so mißt das Galvanometer die den eingestellten Kontakten entsprechenden Stromstärken, welche in den bestimmten Phasen der Bewegung den äußeren Stromkreis durchfließen.

Seitdem Joubert im Jahre 1881 obige Kontaktvorrichtung zum Zwecke versuchsweiser Aufnahme von Wechselstromlinien veröffentlicht hatte, sind zahlreiche andere Bauarten erschienen, sowohl einfache als auch verwickelte. Wir erwähnen hier z. B. diejenigen, bei welchen ein wandernder Lichtpunkt den Verlauf des Wechselstromes auf eine Wand projiziert oder photographiert, Bauarten, wie die erste ähnliche von Oskar Frölich (1887) und die von Franke (1899) in Hannover veröffentlichte. Weitere Methoden: Friedrich Drexler und Behn-Eschenburg,[1] Marcher,[2] Johann Sahulka,[3] W. Peukert,[4] Rud. Franke[5] u. a. Im folgenden soll eine sehr einfache Berührungsvorrichtung besprochen werden, die entsprechend einer von Johann Sahulka[3] angegebenen Methode zur Bestimmung von Spannungs- und Stromlinien von Wechselströmen, von Josef Löwy gebaut wurde. Diese Vorrichtung schließt manche Vorteile gegenüber anderen Bauarten ein, wie insbesondere den einfachen Aufbau, die leichte Handhabung, bequeme Form und die Möglichkeit, mit derselben rasch Linienaufnahmen zu machen. Diese Vorrichtung besitzt entweder einen punktförmigen oder einen segmentförmigen Kontakt. Je nachdem die Vorrichtung den einen oder den anderen Kontakt besitzt, ist ihre Verwendung im Gebrauche eine andere. Die in den Figuren 21, 22 und 23 dargestellte Vorrichtung ist eine solche mit segmentförmigem Kontakt und geeignet zur gleichzeitigen Aufnahme einer Spannungs- und einer Stromlinie. Der Grundsatz der Joubertschen Kontaktvorrichtung ist, daß die einzelnen Phasen des Wechselstromes mit Hülfe eines augenblicklichen Kontaktes aufgenommen werden, und zwar so, daß die Kontaktgebung immer zu anderen Zeiten der Periode stattfindet, wodurch der Verlauf der periodisch veränderlichen Größe punktweise aufgenommen werden kann. Dieses Hinwegschreiten der Kontaktgebung über die einzelnen Phasen der Periode geschieht gewöhnlich durch Verstellen der kontaktherstellenden Bürste tangential längs des Umfanges der Kontaktscheibe. Statt nun die Bürsten zu verstellen, wird bei der vorliegenden Bauart die Kontaktscheibe selbsttätig verstellt, die Bürsten bleiben in unveränderlicher Lage, welcher Umstand für die Bauart der Vorrichtung eine ungemeine Vereinfachung bedeutet. Wir wollen nun an der Hand der Figuren 21 bis 23 an die Besprechung der Vorrichtung gehen. R_1 ist ein auf der Dynamowelle sitzendes Zahnrad. Dieses Rad greift in das Zahnrad R_2 ein. Mit diesem fix verbunden ist das Rad R_3, welches seinerseits in das Rad R_4 eingreift, das mit den Kontaktscheiben C und C_1 ein Ganzes bildet. D und D_1 sind die ständigen, S die segmentförmigen Kontakte. Die Räder R_1, R_2, R_3 und R_4 besitzen beziehungsweise die Zähnezahlen n, $n+1$, n und $n-1$. Macht nun die Dynamowelle, also auch das Zahnrad R_1, während einer gewissen Zeit T, n^2-1 Umdrehungen, so kann man leicht folgern, daß in der gleichen Zeit das Rad R_4, und mit ihm die Kontaktscheiben C und C_1, n^2 Umdrehungen machen, also um eine Umdrehung mehr als die Dynamowelle,

[1]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1896, S. 378.
[2]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1897, S. 552.
[3]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1898, S. 4.
[4]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, S. 622.
[5]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, S. 802.

Fig. 21. Vorrichtung von Sahulka. Aufriß.

Fig 22. Vorrichtung von Sahulka. Kreuzriß.

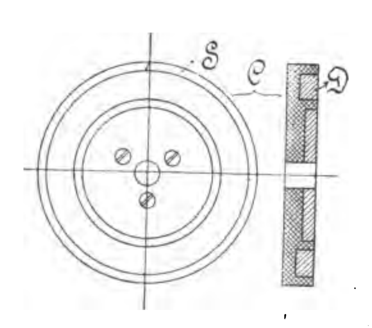


Fig. 23. Vorrichtung von Sahulka.

was gleichbedeutend ist mit dem Verstellen der kontaktgebenden Bürste B in der Zeit T längs des ganzen Umfanges der Kontaktscheibe. Macht nämlich das Rad R_1 während einer gewissen Zeit $n^2 - 1$ Umdrehungen, dann macht das Rad R_2 $\frac{(n^2-1)\,n}{n+1}$ Umdrehungen. Das Rad R_3 macht, nachdem es mit dem Rade R_2 fest verbunden ist, ebenso viele Umdrehungen als das Rad R_2, nämlich $\frac{(n^2-1)\,n}{n+1}$ Umdrehungen. Das Zahnrad R_4, welches in das Rad R_3 eingreift, macht, nachdem es $n - 1$ Zähne besitzt, in der gleichen Zeit

$\frac{(n^2-1) \cdot n}{(n+1)(n-1)} = n$ Umdrehungen. Dieser Umstand bietet die Möglichkeit, sämtliche Phasen des Wechselstromes aufzunehmen, welche einer Umdrehung der Dynamowelle entsprechen. Die Bewegung der Kontaktscheiben setzt sich also aus zwei Bewegungen zusammen, erstens aus der mit der Dynamowelle synchronen und dem allmählichen Vorschub gegenüber der Bürste B. Die Wahl des n liegt in unserer Hand. Machen wir das n größer oder kleiner, dann wird n^2-1, das ist die Umdrehungszahl der Maschine, während welcher die Phasen entsprechend einer Umdrehung der Dynamowelle aufgenommen werden können, größer oder kleiner; wir können also die Zeit, die uns zur Aufnahme der Kurve zu Gebote stehen soll, durch bestimmte Wahl der Zähnezahlen beliebig vergrößern oder verkleinern. Um die Verhältnisse klarer zu machen, möchten wir die besonderen Angaben einer Versuchs-

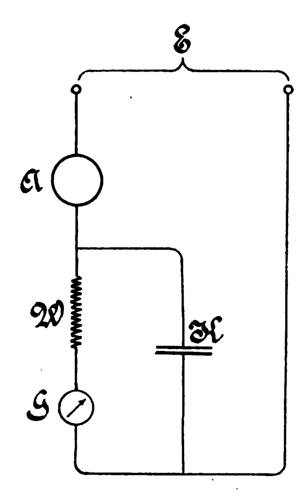


Fig. 24. Aufnahme einer Spannungslinie.

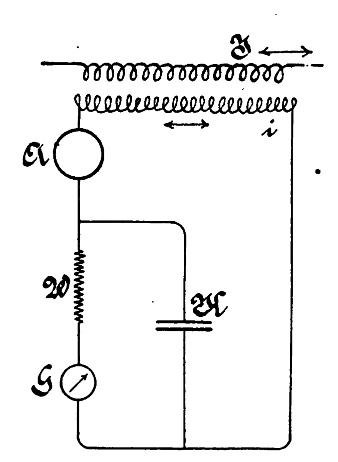
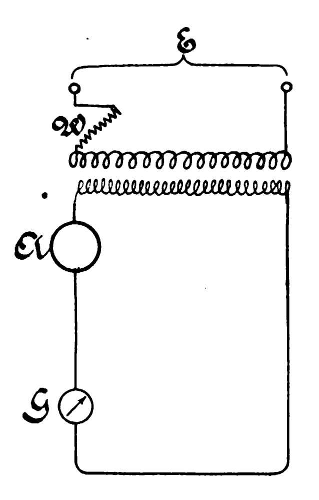
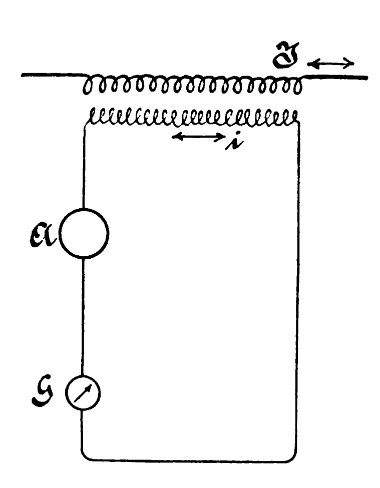


Fig. 25. Aufnahme einer Stromlinie.

anordnung anführen. Der Versuch wurde an einer vierpoligen Wechselstromdynamomaschine vorgenommen, welche in einer Minute 1200 Umdrehungen machte. n ist an der ausgeführten Vorrichtung 160, n^2-1 ist dann 25.599. Bei der bestehenden Umdrehungszahl der Maschine in der Minute macht dieselbe in 1280 Sekunden die vorhin gerechnete Tourenzahl 25.599, das ist also, nachdem die Maschine vierpolig ist die Zeit zur Aufnahme von zwei Perioden. Auf eine Periode entfallen also 640 Sekunden, das sind 10·7 Minuten. Hätten wir bei der Konstruktion $n = 150$ gewählt, wären auf die Meßzeit 9·3 Minuten entfallen und bei der Wahl von $n = 170$, 12 Minuten. Besitzt die Kontaktscheibe einen punktförmigen Kontakt, dann erfolgt die Aufnahme einer Kurve mit der Vorrichtung ganz so wie mit der Joubertschen Kontaktscheibe und wie es die Figuren 24 und 25 zeigen. In der Figur 24 ist die Aufnahme einer Spannungskurve, in Fig. 25 die einer Stromkurve veranschaulicht. In Fig. 24 sei E die aufzunehmende Spannung. Die beiden Punkte, zwischen welchen die Spannung E besteht, seien etwa die beiden Klemmen einer Dynamomaschine. A ist der Kontaktapparat, G ein empfindliches Galvanometer, dem ein großer selbstinduktionsloser Widerstand W in Serie vorgeschaltet und ein Kondensator K parallel geschaltet ist. Der Kondensator

wird allemal dann, wenn durch das Galvanometer ein Ladestrom geht, entsprechend dem Momentanwerte der Wechselspannung zur Zeit des Kontaktschlusses, ebenfalls geladen und in der Zeit zwischen zwei Kontaktschlüssen schickt der Kondensator einen Teil dieser Ladung in das Galvanometer. Auf diese Weise verändert sich der Ausschlag am Galvanometer stetig, die Nadelschwankungen werden infolge der in gewissen, wenn auch kurzen Zeitintervallen erfolgenden Stromstöße gedämpft. In Fig. 25 sei *I* der Wechselstrom, dessen Kurvenform aufgenommen werden soll. Es wäre unmöglich, den Kontaktapparat in die Stromleitung selbst einzubauen; denn abgesehen davon, daß dadurch der zu untersuchende Strom infolge der fortwährenden Unterbrechung betriebsunfähig würde, müßten am Kontaktapparate viel zu starke Funken entstehen. Statt nun die Kurvenform des Stromes *I* zu suchen, bestimmt man die eines vom Strome *I* in einer sekundären Wicklung induzierten Stromes *i*, der die gleiche





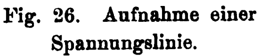


Fig. 26. Aufnahme einer Spannungslinie.

Fig. 27. Aufnahme einer Stromlinie.

Form wie der Strom *I* hat, wenn nur die primäre und sekundäre Wicklung aus selbstinduktionslosen Widerständen besteht. Die primäre Wicklung besteht aus wenig Windungen eines stärkeren Drahtes, die sekundäre Wicklung aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes. Die übrige Schaltung bleibt dieselbe wie bei der vorhin besprochenen Methode zur Aufnahme einer Spannungskurve. Wählt man den Kontakt statt punktförmig, segmentförmig, und zwar so breit, daß während einer Halbperiode der Kontakt geschlossen ist, dann braucht man weder ein empfindliches Galvanometer noch große Widerstände oder einen Kondensator. Wir wollen zunächst die Schaltungen skizzieren, die wir bei Anwendung dieses Apparates treffen müssen, um einerseits Spannungs-, anderseits Stromkurven aufnehmen zu können. Diese Schaltungen sind in den Figuren 26 und 27 dargestellt. Fig. 26 zeigt die Aufnahme einer Spannungskurve. Man verwendet wieder zwei ineinandergesteckte Induktionsspulen. Der primären Spule, die weniger Windungen als die Sekundärspule besitzt, ist ein selbstinduktionsloser Widerstand *W* vorgeschaltet. Statt die Kurvenform der Spannung *E* aufzunehmen, wird die Kurvenform der von der Spannung *E* induzierten Spannung *e* aufgenommen, welche beiden Kurvenformen einander gleich sind. Nachdem der Kontaktschluß bei diesem Apparate länger dauert

als bei dem vorhin beschriebenen Apparate mit punktförmigem Kontakte, wird das Galvanometer eine größere Strommenge erhalten und dadurch gelingt es, viel unempfindlichere Galvanometer bei der Aufnahme von Kurven als bei dem Apparate mit punktförmigem Kontakte zu verwenden. Bei den mit dem Apparate vorgenommenen Versuchen konnten eine Keßlerboussole oder ein Millivoltmeter als Galvanometer benutzt werden. Bei Verwendung der Tangentenboussole erhielt man so große Ausschläge, sie erstreckten sich vom 0-Punkte der Teilung zu beiden Seiten dieses Punktes bis 90°, so daß man Spiegelablesungen völlig entbehren konnte. Obwohl nun der Kontaktschluß während der Dauer einer Halbperiode erfolgt, entspricht dennoch der Ausschlag am Galvanometer nur dem Momentanwerte der Wechselstromkurve zur Zeit des Kontaktschlusses, beziehungsweise dem gleich großen Werte zur Zeit der Kontaktunterbrechung. Denken wir uns, die Sinuskurve in Fig. 28 stelle den Verlauf der Wechselspannung E vor. Der in der Primärspule fließende Wechselstrom würde nun in der Sekundärspule dauernd einen Wechselstrom induzieren, wenn die Sekundärspule fortwährend geschlossen wäre. Nun ist aber die Sekundärspule bloß während der Dauer einer Halbperiode geschlossen, und zwar so, daß z. B. dann der Schluß der Sekundärspule erfolgt, wenn der primäre Strom den Wert A hat, entsprechend dem Punkte a in Fig. 28,

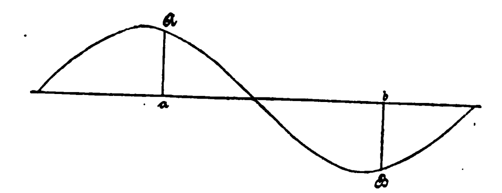


Fig. 28. Wellenlinie eines Wechselstromes.

und die Öffnung der Spule in dem Augenblicke erfolgt, in welchem der primäre Stromwert B ist, dem Punkte b entsprechend. Die Stromwerte A und B sind einander gleich, weil $\overline{a\,b}$ die Größe einer Halbperiode besitzt. Der in der Sekundärspule in dem Augenblicke induzierte Stromwert, in welchem der primäre Stromwert A ist, wird also gleich sein dem induzierten Stromwerte in dem Augenblicke, wenn der primäre Stromwert B beträgt. Obwohl nun A und B entgegengesetztes Vorzeichen haben, wird der induzierte Stromwert in beiden Fällen gleichgerichtet sein, weil die Induktion durch den Strom A beim Schließen der Sekundärspule und die Induktion durch den entgegengesetzten Strom B beim Öffnen der Sekundärspule erfolgt. Die Größe des Ausschlages am Galvanometer wird im wesentlichen durch diese Induktionsstöße bedingt. Die Strommenge, die während des Schlusses der Sekundärspule in das Galvanometer gelangt, hängt auch von den Stromwerten in der Primärspule zwischen den Punkten a und b ab. Diese Stromwerte heben sich in Bezug auf ihre induzierende Wirkung größtenteils auf, weil fast gleich große positive und negative primäre Strommengen innerhalb des Bereiches des Kontaktschlusses liegen und die überschüssige Strommenge dämpfend auf die Nadelbewegung wirkt. Nachdem der segmentförmige Kontakt über die ganze Periode hinschreitet, werden auch der Reihe nach alle Stromwerte einer Periode auf diese Weise aufgenommen. Der in der Figur dargestellte Apparat besitzt segmentförmige Kontakte, die einem Bogen von 90° an den Kontaktscheiben entsprechen, weil die Wechselstrommaschine, für welche der Apparat gebaut wurde, vierpolig war, so daß $^1/_4$ des Umfanges der Kontaktscheibe einer Halbperiode entspricht. Der Apparat besitzt zwei Kontaktscheiben, so daß man gleichzeitig die Strom- und die Spannungskurve aufnehmen

kann. Auf die gleiche Weise wie Strom- oder Spannungskurven kann man auch Magnetfelder aufnehmen. Man braucht zu diesem Zwecke bloß die Sekundärspule in den Bereich eines Feldes zu bringen. Auf diese Weise ist sehr leicht mit dem dargestellten Apparate die Hysteresiskurve eines Eisenkörpers aufzunehmen. Als magnetisierenden Strom verwendet man einen Wechselstrom. Es werden nun mit Hülfe der einen Kontaktscheibe der Stromverlauf und mit Hülfe der anderen Scheibe die Variationen des Feldes aufgenommen. Die Aufnahmen werden so gemacht, daß immer ein Strom- und ein Feldwert gleichzeitig aufgenommen werden. Aus diesen Versuchsresultaten läßt sich dann leicht die Hysteresisschleife bestimmen. Man kann den Apparat auch mit drei Kontaktscheiben ausstatten, so daß er dann dazu benützt werden kann, gleichzeitig die drei Stromkurven oder die drei Spannungskurven eines Drehstromgenerators aufzunehmen. Bei der Aufnahme einer beliebigen Kurve geht man folgendermaßen vor: Man macht eine der früher besprochenen Schaltungen und wartet nun den Zeitmoment ab, in dem die Galvanometernadel durch den 0-Punkt der Teilung geht. Nun mißt man die Zeit, die verstreicht, bis die Nadel den Weg zurückgelegt hat, von diesem 0-Punkte bis zum Punkte des größten Ausschlages nach der einen Seite, von diesem über 0 zurück bis zum Punkte des größten Ausschlages nach der anderen Seite und von hier schließlich wieder zum 0-Punkte zurück; diese Zeit steht also zu Gebote, um sämtliche Stromwerte einer Periode aufzunehmen; sie ist selbstverständlich dieselbe, wie die weiter oben auf rechnerischem Wege bestimmte. Man nimmt nun auf einem Bogen Millimeterpapier ein rechtwinkeliges Koordinatensystem mit dem Scheitel 0 an und trägt auf der Abszissenachse nach beiden Seiten derselben von 0 aus gleiche Strecken auf, je entsprechend der Dauer einer Halbperiode. Die Endpunkte der beiden Strecken entsprechen, ebenso wie der Punkt 0, 0-Werten der aufzunehmenden Sinuskurve. Man teilt nun jede Strecke, die einer Halbperiode entspricht, in eine Anzahl gleicher Teile, welche gleichen Zeitabschnitten entsprechen. Am Ende eines jeden solchen Zeitabschnittes wird eine Ablesung gemacht und diese nach irgend einem Längenmaßstabe als Ordinate aufgetragen, so daß man auf diesem Wege die ganze Stromkurve aufnehmen kann. Nach diesem Versuche müssen noch die wahren Werte der Ordinaten in Ampère oder Volt ermittelt werden. Zu diesem Zwecke wird die Schaltung belassen und in die Primärspule ein Gleichstrom geschickt, dessen Stärke durch Widerstände verändert werden kann. Das Galvanometer gibt bei jeder eingestellten primären Stromstärke einen bestimmten konstanten Ausschlag. Um nun den Stromwert einer beliebigen Ordinate der aufgenommenen Kurve zu bestimmen, wird der Gleichstrom so lange reguliert, bis der konstante Ausschlag am Galvanometer so groß wird, wie der dem Ordinatenwerte entsprechende Ausschlag bei der Aufnahme der Wechselstromkurve. Die Vorrichtung arbeitet sehr gut, nur ist darauf zu achten, daß die Schleiffedern gut aufliegen, da dieselben, wenn sie nicht hinreichend federn und kräftig angedrückt werden, leicht infolge der großen Umlaufszahl der Kontaktscheiben hüpfen und so einerseits den Kontakt vermindern, anderseits Ursache von wenn auch schwachen Funkenbildungen werden können. Die Vorrichtung ist fast ganz aus Messing hergestellt. Das Rad R_1 braucht auf der Dynamowelle nicht fest montiert zu werden, sondern es kann, wo die Verhältnisse an der Maschine es zulassen, mit einer hülsenförmigen Nabe versehen, einfach auf die Welle der Maschine geschoben und auf ihr mittels Stellschrauben befestigt werden. Das Rad könnte auch in dem Gestelle des Kontaktapparates gelagert werden, nur müßte es dann seinen Antrieb von der Maschine durch eine Körnerspitze oder ein biegsames Kabel erhalten. Die Vorrichtung gestattet, dank ihrer festen Konstruktion, einen mehrstündigen Dauerbetrieb, ohne auch nur die geringste Störung des Versuches zu verursachen.

Sehr große Ausschläge an der Boussole können wir nicht verwenden, weil die Ausschläge einer solchen Boussole den Strömen nicht proportional sind, sondern den Tangenten der Ausschlagswinkel. Bei großen Ausschlägen, bei welchen sich die Winkelwerte von den Tangentenwerten der Winkel unterscheiden, wäre die aufgenommene Kurvenform eine falsche. Etwas anderes ist es, wenn die bei Verwendung des Wechselstromes aufgenommenen Stromwerte zuerst ihrem Zahlenwerte nach bestimmt werden, durch Anstellung des Versuches mit Gleichstrom, und die Stromkurve erst mit Hülfe dieser Werte konstruiert wird. Im anderen Falle müssen die Ausschläge an der Boussole auf solche Winkelwerte ermäßigt werden, daß dieselben sich wenig von den Tangentenwerten unterscheiden.

11. Unterschied zwischen Gleich- und Wechselstrom. Der Unterschied zweier Gleichströme besteht nur in den verschiedenen Stromstärken. Fließen zwei oder mehrere Gleichströme durch denselben Draht, so ist die gesamte resultierende Stromstärke gleich der Summe der Stromstärken der einzelnen Gleichströme.

Zwei verschiedene Wechselströme zeigen folgende Eigentümlichkeiten:

1. Die mittlere Stromstärke der beiden Wechselströme kann, so wie bei Gleichströmen, ungleich sein.

2. Die Periode der einzelnen Ströme kann verschieden sein:

Macht z. B. eine 12polige Wechselstrommaschine 1200 Umdrehungen in der Minute, so ist die Anzahl der Polwechsel in der Minute 14.400, die Anzahl der Polwechsel in der Sekunde 240, die Anzahl der Perioden 120 und die Dauer einer Periode $\frac{1}{120}$ Sekunde.

Beträgt die Umdrehungszahl einer zweiten, z. B. 16poligen Wechselstrommaschine, 600 in der Minute, so ist die Anzahl der Polwechsel in der Minute 9600, die Anzahl der Polwechsel in der Sekunde 160, die Anzahl der Perioden in der Sekunde 80 und die Dauer einer Periode $\frac{1}{80}$ Sekunde.

3. Die Perioden der beiden Wechselströme sind gleich, treten jedoch nicht gleichzeitig in ihre größten Werte ein, gehen also auch nicht gleichzeitig durch ihre Werte Null und die zwischen diesen beiden Werten gelegenen Werte hindurch, d. h. die beiden Wechselströme haben eine verschiedene Phase.

Vereinigt man z. B. die Windungen *I* und *III*, Fig. 10, zu einem, die Windungen *II* und *IV* zu einem zweiten Stromkreise, so wird im 1. Stromkreise in der gezeichneten Stellung keine Induktion herrschen, während im 2. Stromkreise die Induktion ihren größten Wert annimmt. Da die beiden Windungspaare 90° voneinander abstehen, ist die Phasendifferenz zwischen den beiden Strömen 90°.

In den Figuren 29 und 30 sind je $1^1/_2$ Perioden solcher Wechselströme durch ihre Wellenlinien wiedergegeben. Die Figuren zeigen, daß der eine Strom immer den Wert Null hat, während der andere seinen größten Wert besitzt.

In A, Fig. 29, besitzt der 1. Wechselstrom den Wert Null, während der 2. zu derselben Zeit in A_1, Fig. 30, seinen größten + Wert erlangt.

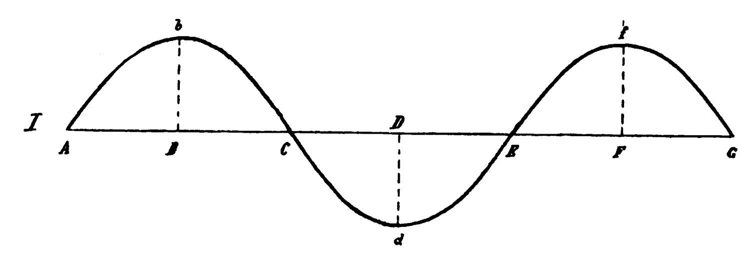


Fig. 29. $1^1/_2$ Perioden eines Wechselstromes.

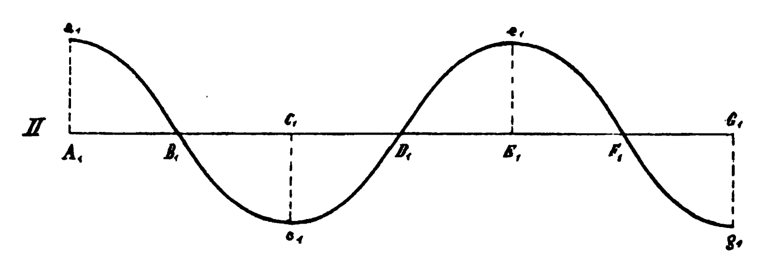


Fig. 30. $1^1/_2$ Perioden eines Wechselstromes.

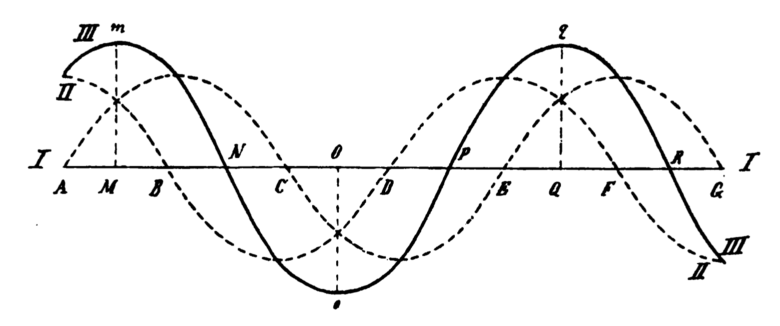


Fig. 31. Summation der Wellenlinien Fig. 29 und 30.

In B, Fig. 29, besitzt der 1. Wechselstrom seinen größten + Wert, während der 2. zu derselben Zeit in B_1, Fig. 30, den Wert Null annimmt.

In C, Fig. 29, besitzt der 1. Wechselstrom den Wert Null, während der 2. in C_1, Fig. 30, seinen größten — Wert erreicht u. s. w.

Denkt man sich nun diese beiden Wechselströme durch einen und denselben Leiter fließend, so summieren sich in jedem Augenblicke die gleichzeitigen Stromstärken.

In Fig. 31 geben die punktierten Wellenlinien *I* und *II* die beiden einzelnen Wechselströme, die stark ausgezogene Wellenlinie *III* den resultierenden Wechselstrom wieder.

Aus der Figur 31 geht hervor:

1. Die resultierenden größten Stromstärken sind größer als jene der einzelnen Wechselströme.

2. Die größte resultierende Stromstärke ist kleiner als die Summe der größten Stromstärken der einzelnen Wechselströme.

3. Die Periode des resultierenden Wechselstromes ist dieselbe wie die der einzelnen Wechselströme.

4. Die Phase des resultierenden Wechselstromes ist eine andere als jene der einzelnen Wechselströme, d. h. der resultierende Wechselstrom und die einzelnen Wechselströme gehen nicht an derselben Stelle (zu derselben Zeit) durch ihre größten, mittleren und Nullwerte hindurch. Der resultierende Wechselstrom geht zwischen den um 90° gegeneinander in der Phase verschobenen einzelnen Strömen durch die größten, mittleren und Nullwerte hindurch. Der resultierende Wechselstrom ist somit um 45° gegen die einzelnen Wechselströme in der Phase verschoben. Solche Phasenverschiebungen (Phasendifferenzen) finden im allgemeinen zwischen zwei oder mehreren Wechselströmen statt.

12. Selbstinduktion. Es ist zur Erzeugung einer Phasendifferenz nicht erforderlich, daß man in einen Leiter mehrere Wechselströme sendet. Eine solche Phasendifferenz wird auch dann hervorgebracht, wenn man einen einzigen Wechselstrom in eine Induktionsspule schickt, weil dieser Wechselstrom einen Strom durch Selbstinduktion erzeugt, der ihm entgegenwirkt.

Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist fortwährenden, augenblicklichen Änderungen unterworfen und wechselt während der Zeitdauer einer Periode einmal ihre Richtung (ihr Zeichen).

Die resultierende Stromstärke wird deshalb ihre größten Werte erlangen, wenn die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion die größten Änderungen erleidet (die Werte Null durchschreitet).

Der größte Wert der induzierenden elektromotorischen Kraft und der Stromstärke werden deshalb nicht gleichzeitig eintreten und der größte Wert der Stromstärke muß geringer sein, als wenn keine Selbstinduktion vorhanden wäre.

Jene elektromotorische Kraft der Selbstinduktion, welche durch eine Änderung der Stromstärke von 0 bis 1 in absoluten Einheiten

hervorgerufen wird, nennt man den Selbstinduktionskoeffizienten und bezeichnet denselben mit dem Buchstaben L.

Die Ursachen der Änderungen der Selbstinduktion sind:

1. Die Änderung der geometrischen Gestalt der Induktionsspulen.
2. Das Anwachsen der Selbstinduktion mit der Anzahl der Windungen der Spule.
3. Das Steigen der Selbstinduktion, wenn sich in der Spule oder im äußeren Stromkreise Eisen befindet.

In konzentrischen Kabeln erscheint, ähnlich wie in bifilaren Drähten (I. T., 1. B., S. 20), die Selbstinduktion aufgehoben; erstere werden deshalb vorteilhaft zur Fortleitung von Wechselströmen benützt.

Die Selbstinduktion bewirkt in starken Leitern eine ungleiche Verteilung des Stromes in den einzelnen Querschnitten. Diesem Übelstande wird dadurch abgeholfen, daß man anstatt eines starken Leiters mehrere voneinander isolierte schwächere Leiter wählt.

Schaltet man einen Elektromagnet in den Anker oder in die Feldmagnete eines Wechselstrommotors ein, so kann man die Umdrehungszahl ohne stromkonsumierenden Widerstand regulieren; ein Verlust an Strom findet dabei nicht statt (Wechselstrommotor nach Dèri). Eine Induktionsspule gleicht, einer Wechselstrombogenlampe vorgeschaltet, die Schwankungen im Lichtbogen derselben aus, ohne Strom (beziehungsweise Energie) zu tilgen. Man nennt solche Widerstände, welche durch Selbstinduktion wirken, energielose Widerstände.

Schickt man nämlich in einen Elektromagnet einen Wechselstrom, so erzeugt derselbe in seinem Eisenkerne ein magnetisches Feld, welches in den Windungen Strom entgegengesetzter Richtung hervorruft und so das Zustandekommen der vollen Stromstärke, welche dem Ohmschen Widerstande der Windungen entsprechen würde, verhindert.

Die Selbstinduktion tritt in jedem sich bewegenden Metallteile eines Induktors auf, ebenso in den Eisenkernen, ja sogar in der Antriebswelle.

In jedem Eisenteilchen entsteht in dem Augenblicke, in welchem es in die Lage der Umkehrung des Magnetismus gelangt, ein Strom, der diese Umkehrung des Magnetismus verzögert. Dadurch wird das Eisen scheinbar träge in Bezug auf eine Änderung im Magnetismus und erwärmt. Diese Magnetisierung (elektrostatische Hysteresis) ist bei hohen Wechselzahlen sehr bedeutend. Man teilt deshalb den Eisenkern der Dynamo in voneinander durch einen Isolator (in der Regel Papier) getrennte Scheiben.

Hochgespannte Ströme, z. B. die Magnetströme von hochgespannten Nebenschlußmaschinen, darf man nie plötzlich unterbrechen, denn die

elektromotorische Kraft des Selbstinduktionsstromes würde die Isolationsmittel durchschlagen.

Die Selbstinduktion hemmt Stromänderungen, verlangsamt also das Anwachsen und Abfallen des Stromes; man nennt sie deshalb auch elektrische Trägheit.

Die Selbstinduktion wirkt ähnlich wie ein Widerstand, welcher den eigentlichen Ohmschen (ohne Strom gemessenen) Widerstand erhöht.

Bestimmung des Selbstinduktionskoeffizienten einer Wechselstrommaschine. Man erregt die Feldmagnete mit der normalen Stromstärke und schickt durch den ruhenden Anker einen Wechselstrom, welcher der Stromstärke und Wechselzahl der normalen Leistung der Maschine gleichkommt. Gemessen werden J (Stromstärke), E (Spannung an den Ankerklemmen), W (Ohmscher Ankerwiderstand). L rechnet man aus der Formel $J = \frac{E}{\sqrt{W^2 + \omega^2 L^2}}$, (§ 21). Abgesehen von einer Magneterregung bestimmt man auf dieselbe Art den Selbstinduktionskoeffizienten eines Elektromagnetes (Drosselspule).

13. Selbstinduktion und Kapazität. Der Kondensator besitzt eine Art negativer Selbstinduktion. In einem Stromkreise, innerhalb dessen sich eine Kapazität befindet, wird der Strom beschleunigt (Phasen-Voreilung), die Selbstinduktion eines Stromkreises dagegen verzögert denselben (Phasen-Nacheilung). In Telephonkreisen, welche eine Kapazität enthalten, werden gewisse Wellen beschleunigt, Selbstinduktion dagegen verzögert in solchen Stromkreisen bestimmte Wellen. In beiden Fällen wird das Gespräch undeutlich. Durch passende Wahl von Selbstinduktion und Kapazität wird jede Störung vermieden.

Während die Selbstinduktion wie das Anwachsen eines Widerstandes wirkt, gilt von der Kapazität fast das Umgekehrte.

Könnte man sämtliche Abteilungen einer Dynamo durch einen Kondensator überbrücken, so würde durch die Kapazität desselben der Widerstand, während die Abteilungen unter die Bürsten kommen, verkleinert.

Beim Rhumkorffschen Funkeninduktor kann man durch das Einschalten eines entsprechend großen Kondensators die Funkenbildung, die beim Öffnungsfunken eintritt, vollständig vermeiden, dagegen werden dann die Schließungsfunken sehr kräftig, weil sich der Kondensator beim Schließen des Apparates entladet. Falls ein Kondensator Anwendung findet, wählt man seine Abmessungen so, daß die beiden Funken gleich stark ausfallen.

Der Kondensator hat den Zweck, den Verlauf der Induktionsströme zu verkürzen, so die in der Zeiteinheit hervorgerufene elektro-

motorische Kraft zu steigern, ändert aber den Summenstrom der in der sekundären Rolle auftretenden Induktion nicht. Eine genaue Erklärung dieser Erscheinung gab Rayleigh (1876). Derselbe beobachtete die durch eine Leydenerflasche erzeugten Schwingungen, während in die Leitung zugleich eine Induktionsspule und ein Kondensator eingeschaltet waren. Er zeigte durch vielfache Versuche, daß die Kapazität und die Selbstinduktion entgegengesetzte Rollen spielen.

Ein Kondensator hat demnach insbesondere folgende Eigenschaften:

1. Der Kondensator beschleunigt die Phasen der Wellen (Phasen-Voreilung der Wellen).

2. Der Kondensator amplifiziert die Größe (vergrößert die Amplituden) der Wellen.

Die Selbstinduktion hat die entgegengesetzten Eigenschaften.

Zwischen den Kondensatorplatten findet ein Durchdringen der Elektrizität statt; die dadurch entstehenden Verluste sind bei geringen Wechselzahlen ganz unbedeutend.

Tönt ein Kondensator, so ist er in Gefahr. Paraffiniertes Papier erhitzt sich sehr stark, tönt leicht und fängt bald an zu brennen.

Schon auf der elektrischen Ausstellung im Kristallpalaste zu London (1892) hatte die Firma Swinburne & Co. in Teddington [1]) einen für Versuchszwecke bestimmten Wechselstromkondensator für 130.000 Volt ausgestellt.

Für geringe Selbstinduktion und Kapazität hat Chaperon eine eigene Wicklung der Widerstände angegeben (I. T., 2. B., S. 7). Cauro wickelt ebenso wie Chaperon, geht jedoch nach Ausführung einer Wicklungslage mittels eines gerade geführten Drahtes zurück und beginnt so die einzelnen Lagen immer an demselben Ende. Dadurch wird die Kapazität halb so groß wie bei Chaperon.

14. Verhältnis zwischen maximaler und mittlerer elektromotorischer Kraft. Denkt man sich die Summe sämtlicher EMK innerhalb einer halben Periode, Fig. 11, durch eine mittlere elektromotorische Kraft $M(E)$ ersetzt, so kann man sich dieselbe als die Höhe eines über 0 und 180° bezeichneten Rechteckes darstellen. Setzt man diese Höhe gleich $h = \frac{2a}{\pi}$, so wird man finden, daß die Fläche des Rechteckes gleich ist der Fläche des von der Sinuslinie zwischen 0 und 180° und der Abszissenlinie begrenzten Fläche, d. h. die mittlere elektromotorische Kraft $M(E) = \frac{2a}{\pi} = 0{\cdot}636620\,a$ und demnach ist die

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin 1892, S. 267.



größte elektromotorische Kraft $a = \frac{M(E)\pi}{2} = 1{\cdot}57080\ M(E)$. Oder kurz gesagt: Addiert man sämtliche *EMK* innerhalb einer halben Periode und dividiert durch die Anzahl sämtlicher *EMK*, so findet man $M(E) = 0{\cdot}636620\,a$.

15. Mittelwerte periodisch veränderlicher Größen (Blakesley). Bei den Instrumenten, welche auf der Wärmewirkung beruhen, ist die Wärmewirkung, bei den Elektrodynamometern die abstoßende Kraft, dem Quadrate der Stromstärke proportional. Die Instrumente messen nicht die einzelnen Werte der Stromstärke bezw. der elektromotorischen Kraft, sondern nur ihre Mittelwerte, die sogenannte effektive Stromstärke bezw. Spannung. Die Stromstärke z. B., welche man mit obigen Instrumenten bei Gleichstrom erhält, ist mit der effektiven Stromstärke bei Wechselstrom zu vergleichen. J, Fig. 32, sei die größte Stromstärke, i ein augenblicklicher Wert der Stromstärke. Wir wollen die Gesamtwirkung der aufeinanderfolgenden augenblicklichen Stromwerte z. B.

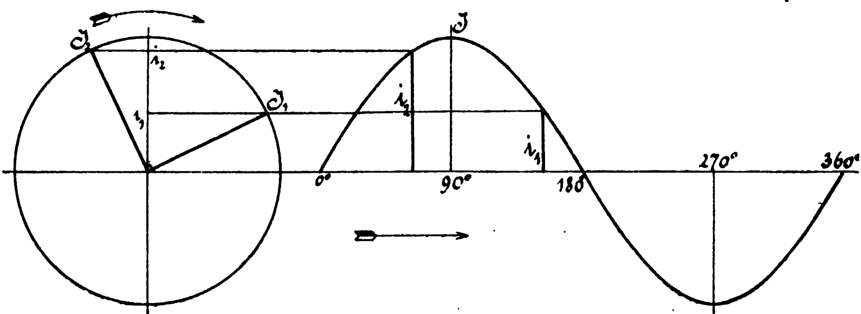


Fig. 32. Effektiver Wert eines Wechselstromes. Im Mittelpunkte des Kreises lies O.

auf das Elektrodynamometer bestimmen. Die einzelnen Stromwerte sind die Projektionen der größten Stromstärke J auf die Ordinatenachse. Fassen wir je 2 Projektionen (augenblickliche Werte) zusammen, welche um 90° auseinander befindlichen Stromstärken entsprechen, z. B. i_1 und i_2. Die rechtwinkligen Dreiecke $O\,J_1\,i_1$ und $O\,J_2\,i_2$ sind kongruent, weil die Hypotenusen und die Winkel $O\,J_1\,i_1$ und $O\,J_2\,i_2$ einander gleich sind; die Seiten der letzteren Winkel stehen aufeinander senkrecht.

Daraus folgt, da $J_1 = J_2 = J$, sofort:

$$i_1^2 + i_2^2 = J^2 \text{ und } \frac{i_1^2 + i_2^2}{2} = \frac{J^2}{2} \text{ oder } \sqrt{\frac{i_1^2 + i_2^2}{2}} = \sqrt{\frac{J^2}{2}}, \text{ d. h.}$$

der Mittelwert der Quadrate der augenblicklichen Stromstärken i_1 und i_2 ist gleich dem halben Quadrate der größten Stromstärke J. Die am Instrumente abgelesene Stromstärke oder Spannung nennt man effektiv.

$i_f = \frac{J}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}7070\,J$, gültig für alle Instrumente, deren Wirkung von dem Quadrate der Stromstärke abhängt. Dasselbe gilt für Spannungen

$$e_f = \frac{E}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}7070\ E.$$

16. Leistung des Wechselstromes. Um die effektive Leistung des Wechselstromes zu bestimmen, greifen wir, Fig. 33, ähnlich wie in § 15, zwei Leistungswerte heraus, welche um $\frac{\pi}{2}$ oder 90^0 voneinander abstehen.

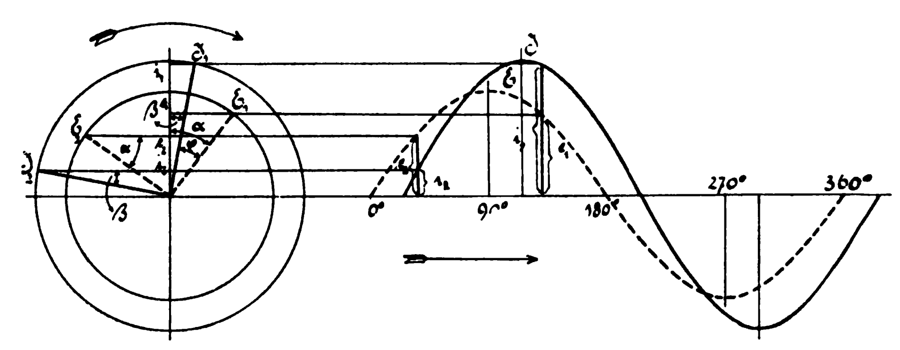


Fig. 33. Leistung des Wechselstromes.

Die zugehörigen Stromstärken oder Spannungen haben gegeneinander die Phasenverschiebung φ. Je zwei solche zusammengehörige Vektoren geben als Mittelwert die effektive Leistung des Wechselstromes an, d. h. $W = \frac{e_1 i_1 + e_2 i_2}{2}$ = Mittelwert der Leistung.

$$e_1 i_1 = E_1 J_1 \cos\alpha \cos\beta,$$

$$e_2 i_2 = E_2 J_2 \sin\alpha \sin\beta, \text{ worin } E_1 = E_2 = E \text{ und } J_1 = J_2 = J.$$

$$W = \frac{e_1 i_1 + e_2 i_2}{2} = \frac{E J \sin\alpha \sin\beta + E J \cos\alpha \cos\beta}{2} \text{ oder}$$

$$W = \frac{E J (\sin\alpha \sin\beta + \cos\alpha \cos\beta)}{2} = \frac{E J \cos(\alpha - \beta)}{2} = \frac{E J}{2} \cos\varphi$$

und weil $e_f = \frac{E}{\sqrt{2}}$ und $i_f = \frac{J}{\sqrt{2}}$ (§ 15), so ist

$$W = \frac{1}{2} e_f \sqrt{2} \,.\, i_f \sqrt{2} \cos\varphi \text{ oder}$$

$$W = e_f\, i_f \cos\varphi,$$

worin e_t und i_t die Ablesungen am Elektrodynamometer oder Hitzdrahtinstrumente bedeuten. $\cos \varphi$ nennt man Leistungsfaktor.

In Fig. 34 ist die Stromstärke i und die *EMK* e gegeben; dieselben haben keine Phasenverschiebung gegeneinander. Man soll mit Benützung der Angaben in derselben Figur die Leistung dieses Wechselstromes durch ein Wellendiagramm bestimmen. Eine Einheit dieser Figur $= 3\,mm$. Im Punkte 0 sind die Stromstärke und die Spannung $= 0$; es muß also auch ihr Produkt $= 0$ sein. Die größte Stromstärke beträgt 3 Ampère, die größte Spannung 5 Volt; daraus folgt als maximale Leistung $3 \times 5 = 15$ Watt $= 15$ Einheiten $= 45\,mm$. Zwischen dem

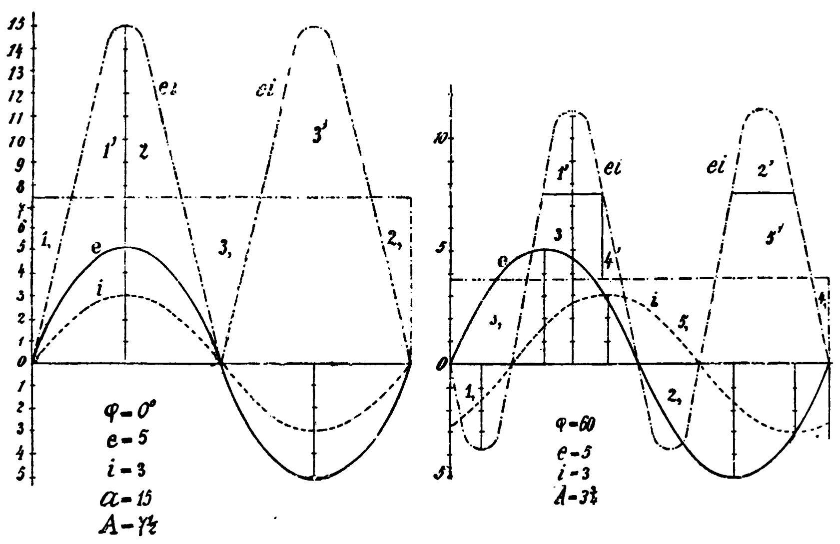


Fig. 34. Leistung des Wechselstromes bei 0° Phasendifferenz.

Fig. 35. Leistung des Wechselstromes bei 60° Phasendifferenz $a = 11{\cdot}3$.

$$A = \frac{e}{\sqrt{2}} \frac{i}{\sqrt{2}} \cos \varphi = 3^3/_4.$$

Null- und Höchstwerte liegen alle übrigen Werte. Man findet dieselben, ebenso wie zuvor den Höchstwert, durch Multiplikation der senkrecht übereinander sich ergebenden Stromstärken und *EMK*. In dem Falle also, als keine Phasenverschiebung zwischen Strom und *EMK* stattfindet, ist die Leistung des Wechselstromes dieselbe, wie diejenige des Gleichstromes, da ja für $\varphi = 0$ die Formel $W = e_t\ i_t\ \cos \varphi$ in die Formel $W = e_t\ i_t$ übergeht. Die Leistung des Wechselstromes ist durch die strichpunktierte Kurve und von der durch 0 gezogenen Abszisse umgrenzt. Aus der Figur ist es ersichtlich, daß die Flächen $1. = 1'$, $2, = 2$, $3, = 3'$, so daß man die Fläche, welche von der Abszisse durch 0 und

den strichpunktierten Kurven eingeschlossen erscheint, durch das Rechteck, welches die Abszissenachse, die Ordinatenachse und die zwei strichpunktierten Geraden einschließen, ersetzen kann. Jede dieser Flächen stellt somit die gesamte Leistung des Wechselstromes vor. Bezüglich der Leistungsflächen gelten auch für die Figur 35 bis 37 dieselben Betrachtungen. Während jedoch in Fig. 34 die Leistungsflächen nur oberhalb der Abszissenachse liegen, befinden sich dieselben in den folgenden Figuren 35 bis 37 zum Teile oberhalb (+ Leistung), zum Teile unterhalb (— Leistung) der Abszissenachse. Die Flächeninhalte der von den strichpunktierten Kurven und den Abszissenachsen eingeschlossenen

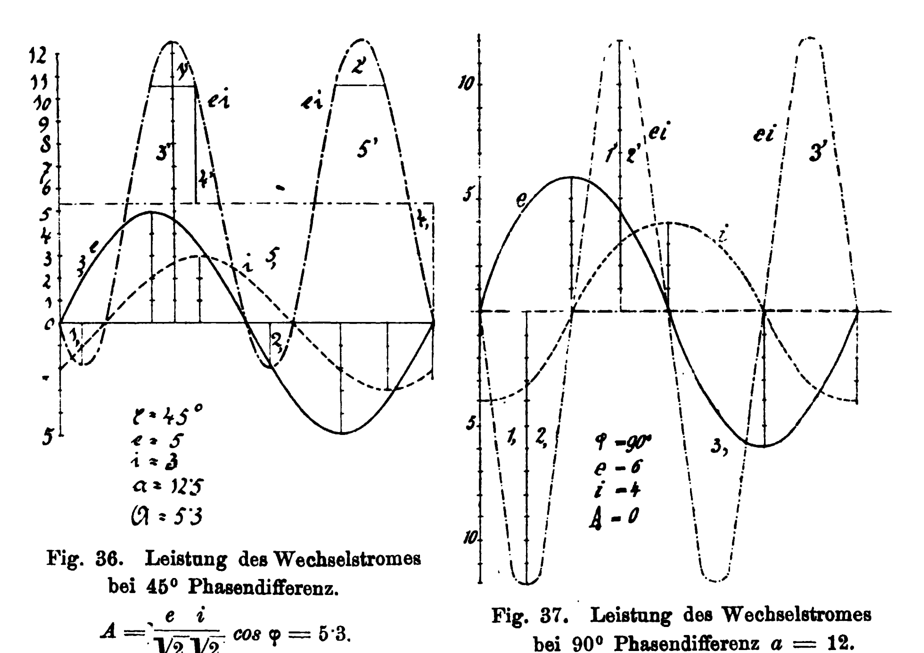


Fig. 36. Leistung des Wechselstromes bei 45° Phasendifferenz.

$$A = \frac{e}{\sqrt{2}} \frac{i}{\sqrt{2}} \cos \varphi = 5{\cdot}3.$$

Fig. 37. Leistung des Wechselstromes bei 90° Phasendifferenz $a = 12$.

Kurven stellen die effektiven Leistungen der Wechselströme während einer Periode dar, während die einzelnen Ordinaten innerhalb dieser Periode die einzelnen Werte der Leistung angeben. Nach obigem erscheint es wohl als selbstverständlich, daß die effektive Leistung des Wechselstromes während einer halben Periode so wie in Fig. 34 auch in den Figuren 35 und 36 je durch die Rechtecke zwischen der Abszissenachse, Ordinatenachse und den 2 strichpunktierten Geraden gegeben sind. Aus der Figur 37 ersieht man, daß diese Leistung den Wert 0 hat, da die positiven und negativen Leistungsflächen einander gleich sind. Man nennt deshalb einen solchen Strom, welcher gegen seine Spannung eine

Phasenverschiebung von 90° besitzt, einen „wattlosen" Strom. In den Figuren 34 bis 37 sind schließlich die Phasenverschiebungen φ, Spannungen e, Stromstärken i, maximale Leistungen a und effektive Leistungen A angegeben.

Mit einem Wattzeiger mißt man die Watt $= e_t \; i_t \cos \varphi$, mit einem Spannungszeiger e_t und mit einem Stromzeiger i_t. Dividiert man die Ablesung am Wattzeiger durch das Produkt der Ablesungen am Spannungs- und Stromzeiger, so erhält man den Leistungsfaktor $\cos \varphi$, entsprechend der Formel: $\cos \varphi = \frac{\text{Watt}}{e_t \; i_t}$.

17. Fernwirkung eines Magnetstabes. Betrachten wir die Einwirkung zweier Magnete aufeinander. Östlich, Fig. 38, I. Hauptlage, oder westlich von einer kurzen Magnetnadel $n\,s$ befindet sich ein Magnetstab $N\,S$. Der Mittelpunkt der drehbaren Magnetnadel falle in die Verlängerung der Achse des Magnetstabes. Letzterer wirkt nun so auf die Magnetnadel ein, daß die Längenachse der Magnetnadel und die Achse des Magnetstabes zusammenfallen. In der Figur stehen diese Achsen aufeinander lotrecht. Die Kraft, mit welcher der Magnetstab die Magnetnadel zu drehen sucht, berechnen wir in der folgenden Weise: Wir denken uns den Magnetstab $N\,S$ in einzelne Elementarmagnete $+\mu$, $-\mu$, Fig. 39, mit dem Polabstande δ zerlegt und lassen einen Elementarmagnet auf die magnetische Menge (I. T., 1. B., S. 92) $+\mathfrak{m}$ einwirken. Nach dem Coulombschen Gesetz, welches sich durch Versuche leicht nachweisen läßt, ist die Einwirkung zweier magnetischer Mengen aufeinander dem Produkte der beiden magnetischen Mengen gerade, dagegen dem Quadrate der Entfernung verkehrt proportional. Die Einwirkung von $+\mu$ auf $+\mathfrak{m} = \frac{\mathfrak{m}\,\mu}{\left(x - \frac{\delta}{2}\right)^2}$. Dieser Quotient ist $+$, weil sich die Kraftlinien dieser beiden magnetischen Mengen voneinander wegdrängen (weil sich die beiden Magnetismen abstoßen). Die Einwirkung von $-\mu$ auf $+\mathfrak{m} = -\frac{\mathfrak{m}\,\mu}{\left(x + \frac{\delta}{2}\right)^2}$. Dieser Quotient ist $-$, weil die Kraftlinien dieser beiden magnetischen Mengen ineinander übergehen (weil sich die beiden Magnetismen anziehen). Die Gesamtwirkung P_1 von $+\mu$ und $-\mu$ auf $+\mathfrak{m}$ setzt sich daher aus diesen beiden letzteren Wirkungen zusammen und hat deshalb den Wert:

$$P_1 = \frac{\mathfrak{m}\,\mu}{\left(x - \frac{\delta}{2}\right)^2} - \frac{\mathfrak{m}\,\mu}{\left(x + \frac{\delta}{2}\right)^2} = \mathfrak{m}\,\mu \frac{\left(x + \frac{\delta}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{\delta}{2}\right)^2}{\left(x - \frac{\delta}{2}\right)^2 \left(x + \frac{\delta}{2}\right)^2}.$$

Vernachlässigen wir im Nenner $\frac{\delta}{2}$ gegen x, so erhalten wir:

$$P_1 = \frac{2\,\mathfrak{m}\,\mu\,\delta}{x^3}.$$

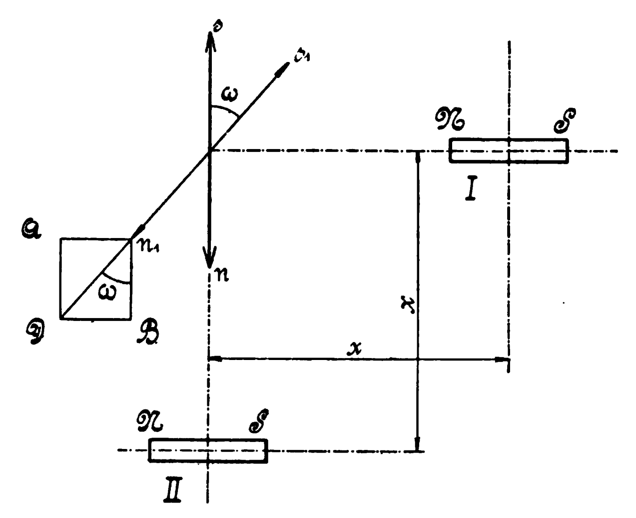


Fig. 38. **Einwirkung zweier Magnete aufeinander.**

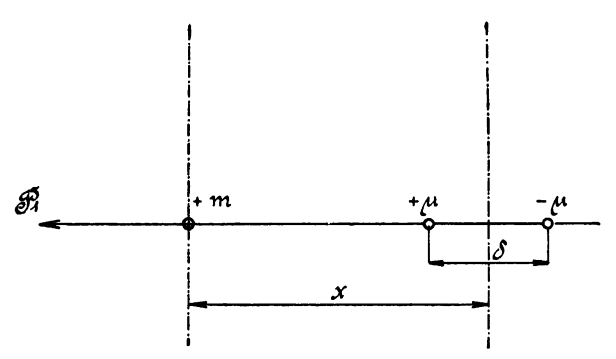


Fig. 39. **Einwirkung eines Elementarmagneten auf eine magnetische Menge.**

Daraus ergibt sich die Gesamtwirkung P von NS auf $+\mathfrak{m}$, in dem wir anstatt des Momentes des Elementarmagneten $\mu\,\delta$ das Moment des ganzen Magnetstabes $\Sigma\,\mu\,\delta$ (Summe aller Momente $\mu\,\delta$) in die letzte Formel einführen:

$$P = \frac{2\,\mathfrak{m}}{x^3}\,\Sigma\,\mu\,\delta$$

oder wenn wir für $\Sigma \mu \delta = \mathfrak{M}$ einsetzen:

$$P = \frac{2 \mathfrak{M} \mathfrak{m}}{x^3}.$$

Auf die Magnetnadel $n\,s$ wirken zwei Kräfte ein, und zwar:

1. Die ablenkende Kraft des Magnetstabes NS in der Richtung $n_1\,A$.

2. Die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus in der Richtung $n_1\,B$.

Diese beiden Kräfte geben die Resultierende $n_1\,D$, in welche sich die Nadel $n\,s$ einstellt.

18. Permeabilität, Suszeptibilität. Die verschiedenen Substanzen sind für die Kraftlinien verschieden durchlässig. Die größte magnetische Permeabilität (Durchlässigkeit, Durchströmbarkeit des Eisens für magnetische Kräfte) zeigen Eisen, Kobalt und Nickel. Bezeichnen wir mit $\mathfrak{B}$ (Magnetische Induktion) die Anzahl der Kraftlinien für 1 cm^2 im Eisen und mit $\mathfrak{H}$ (Magnetische Feldstärke, I. T., 1. B., S. 93) die Anzahl der Kraftlinien für 1 cm^2 in der Luft, so wird die Permeabilität $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$ (I. T., 2. B., S. 101). Setzen wir für die Luft $\mu = 1$, so ist

für alle paramagnetischen Substanzen $\mu > 1$,
für alle diamagnetischen Substanzen $\mu < 1$,
für gutes Schmiedeeisen $\mu = 2000$ bis 3000,
für Wismut $\mu = 0{\cdot}99982$.

In der Formel $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$ wird für $\mu = 1$ auch $\mathfrak{B} = \mathfrak{H}$, dann bedeutet $\mathfrak{B}$ nicht mehr die Anzahl der Kraftlinien im Eisen, sondern die Anzahl der Kraftlinien in der Luft.

Vergleicht man die Intensität der Magnetisierung (I. T., 1. B., S. 93) mit der Feldstärke $\mathfrak{H}$, so nennt man dieses Verhältnis die magnetische Suszeptibilität (suszeptibel heißt empfindlich, empfänglich), d. h. die Suszeptibilität $\chi = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$. Besondere Werte der Suszeptibilität sind:

Für Luft $\chi = 0$.
Für paramagnetische Substanzen $\chi = +\ (\chi > 0)$.
Für diamagnetische Substanzen $\chi = -\ (\chi < 0)$.
Für weiches Eisen $\chi = 200$ bis 300.

Zwischen Permeabilität und Suszeptibilität ergeben sich folgende Beziehungen: Denken wir uns einen von einem Solenoid umgebenen Eisenstab von dem Polabstande L und der Polstärke (I. T., I. B., S. 92)

$\mathfrak{m}$, so gehen von dem Nordpole dieses Stabes $4\pi\mathfrak{m}$ Kraftlinien aus (I. T., 2. B., S. 100). Der Querschnitt des Stabes sei f. Das Solenoid erzeugt $f\mathfrak{H}$ Kraftlinien. Die Gesamtzahl der Kraftlinien, welche durch die Mitte des Eisenstückes hindurchgeht, beträgt dann $N = f\mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{m}$. Daraus folgt $\frac{N}{f} = \mathfrak{B} = \mathfrak{H} + \frac{4\pi\mathfrak{m}}{f}$. Nun ist aber (I. T., 1. B., S. 93) $\frac{\mathfrak{M}}{V} = \frac{\text{Magnetisches Moment}}{\text{Volumen}} = \frac{\mathfrak{m}L}{fL} = \frac{\mathfrak{m}}{f} = \mathfrak{J} =$ magnetisches Moment bezogen auf die Volumseinheit oder Intensität der Magnetisierung. Setzen wir den letzteren Wert $\frac{\mathfrak{m}}{f} = \mathfrak{J}$ in Gleichung $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + \frac{4\pi\mathfrak{m}}{f}$ ein, so erhalten wir $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}$. Die Polstärke $\mathfrak{m}$ des Eisenstabes und daher auch $\frac{\mathfrak{m}}{f}$ hängen von der Größe $\mathfrak{H}$ ab, letztere wächst mit $\mathfrak{J}$, d. h. $\mathfrak{J} = \chi\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\chi\mathfrak{H} = (1 + 4\pi\chi)\mathfrak{H}$. Nach früherem war $\mathfrak{B} = \mu\mathfrak{H}$. Es muß demnach $1 + 4\pi\chi = \mu$ oder $\chi = \frac{\mu - 1}{4\pi}$ sein.

μ und χ sind für den magnetischen Zustand einer Substanz charakteristisch. Die letzten Formeln für μ und χ gestatten eine dieser Zahlen aus der anderen zu berechnen. Für die verschiedenen Fälle der Praxis ist bald die eine, bald die andere dieser Zahlen besser verwendbar. Die beiden Größen μ und χ sind keine wirklichen Konstanten, weil sie von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ abhängen. Je nach der Stärke des Magnetfeldes besitzt dieselbe Substanz andere Permeabilität und Suszeptibilität. Aus den letzten Gleichungen folgt ohneweiters: $\chi = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$ und $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$. Für Luft ist $\mu = 1$, also $\chi = O$.

19. Fernwirkung eines Kreisstromes. Denkt man sich ein Leiterelement s, Fig. 40, von einem Strome J durchflossen, so wird dasselbe auf einen Magnetpol von der Stärke $\mathfrak{m}$ in der Entfernung r eine Kraft P ausüben, so daß nach Biot-Savart $P = \frac{J\mathfrak{m}s}{r^2}$ (I. T., 1. B., S. 28). Der Antrieb der Polstärke $\mathfrak{m}$ wird in der Richtung $\mathfrak{m}B$ erfolgen. Zerlegt man die Resultierende $\mathfrak{m}B$ in die zwei Komponenten $\mathfrak{m}E$ und $\mathfrak{m}D$, so ist sofort klar, daß sich die Komponenten $\mathfrak{m}E$ gegenseitig aufheben. Alle diese Komponenten liegen in einer Kreisfläche und je zwei Komponenten, welche in einem Durchmesser liegen, werden sich aufheben. Es bleibt demnach nur die Summe der Komponenten μD als Gesamtwirkung übrig. $\triangle\,\mathfrak{m}CA \sim \triangle\,\mathfrak{m}DB$. Es verhält sich demnach:

$$\mathfrak{m}D : P = R : r \text{ oder } \mathfrak{m}D = \frac{PR}{r}.$$

Setzen wir in diese Gleichung $P = \frac{J \mathfrak{m} s}{r^2}$, so folgt $\mathfrak{m} D = J \mathfrak{m} R \frac{s}{r^3}$ und die Gesamtwirkung des ganzen Stromkreises in der Richtung $\mathfrak{m} D$ oder die Summe aller $\mathfrak{m} D = \Sigma \mathfrak{m} D$ erhalten wir, wenn wir für das Leiterelement s sämtliche Leiterelemente oder den ganzen Kreisumfang $2 \pi R$ in die letzte Formel einführen. Dann wird $\Sigma \mathfrak{m} D = \frac{2 \pi \mathfrak{m} J R^2}{r^3}$.

Bei Benützung der Integralrechnung wäre $\int_0^{2 \pi R} ds = 2 \pi R$.

Wenn die Entfernung x sehr groß ist, wird $x = r$ und

$$\Sigma \mathfrak{m} D = \frac{2 \pi R^2 J \mathfrak{m}}{x^3}.$$

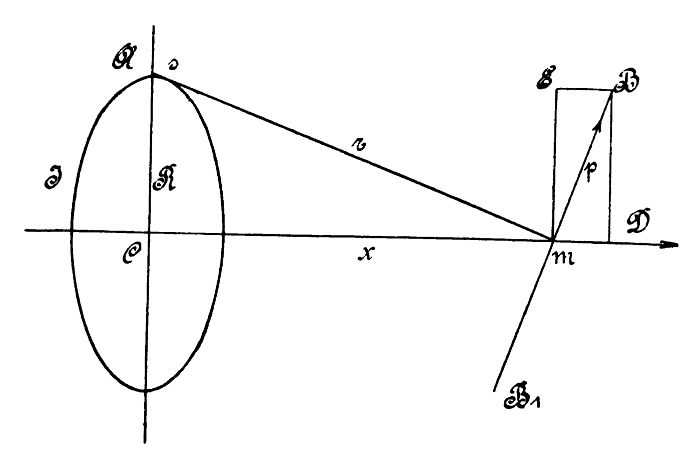


Fig. 40. Fernwirkung eines Kreisstromes.

Die Fernwirkung eines Magnetstabes vom Momente $\mathfrak{M}$ war gleich $\frac{2 \mathfrak{M} \mathfrak{m}}{x^3}$ (§ 17). Daraus folgt, daß der Kreisstrom eine Fernwirkung ausübt, wie ein Magnetstab vom Momente $\mathfrak{M} = \pi R^2 J$ (Magnetisches Moment eines Kreisstromes) oder für $f = \pi R^2$ erhalten wir $\mathfrak{M} = J f$ und $\Sigma \mathfrak{m} D = \frac{2 J f \mathfrak{m}}{x^3}$. Wir können uns also einen Kreisstrom durch ein in der Mitte desselben auf seiner Ebene lotrecht stehendes kurzes Magnetstäbchen vom Momente $\pi R^2 J$ ersetzt denken. Das magnetische Moment eines Kreisstromes ist also auch gleich dem Produkte der Kreisfläche mit der Stromstärke. Für das Moment einer Spirale wird

$$\mathfrak{M} = J \; \Sigma f.$$

20. Intensität des magnetischen Feldes. Man nimmt an, daß von einem Einheitspole 4π Kraftlinien ausgehen (I. T., 2. B., S. 100). Demnach beträgt die Anzahl der Kraftlinien, welche von der magnetischen Menge $\mathfrak{m}$ ausgehen, $N = 4\pi\mathfrak{m}$. Nach § 18 ist $\mathfrak{M} = \mathfrak{m}\, l$, nach § 19 ist $\mathfrak{M} = f\, i\, Z$, wenn Z Windungen vorhanden sind. Wir erhalten daher $\mathfrak{m}\, l = f\, i\, Z$ und $\mathfrak{m} = \frac{f\, i\, Z}{l}$. Setzen wir diesen Wert in die Formel $N = 4\pi\mathfrak{m}$ für $\mathfrak{m}$ ein, so ergibt sich $N = \frac{4\pi f\, i\, Z}{l}$. Für $\frac{Z}{l} = n$ wird $N = 4\pi f\, i\, n$. Dabei wurde i in absoluten Einheiten eingeführt. Setzen wir dagegen i in Ampère ein, so müssen wir durch 10 dividieren (I. T., 1. B., S. 96). Dann ist $N = \frac{4\pi}{10} f\, i\, n$ und $\mathfrak{H} = \frac{N}{f} = \frac{4\pi}{10} n\, i = 1{\cdot}256\, n\, i$. Beträgt der Querschnitt der Spirale $f\, cm^2$, so gehen durch ihr homogenes Innere an jeder Stelle $4\pi\frac{Z}{l} . f\, i$ Kraftlinien hindurch. Jede der einzelnen Z Windungen umschließt diese Anzahl Kraftlinien. Die gesamte von dem zur Spirale aufgewickelten Teile der Strombahn umschlossene Kraftlinienzahl beträgt demnach $N = \frac{4\pi Z^2}{l} . f\, i$. Befindet sich im Innern der Spirale eine Substanz von der Permeabilität μ, so erhöht sich dieser Betrag auf das μ fache, d. h.: $N = \frac{4\pi\mu Z^2 f}{l} . i$. Den Proportionalitätsfaktor bezeichnet man mit $L_s = \frac{4\pi\mu Z^2 f}{l}$.

L_s hängt demnach nur von der geometrischen Beschaffenheit des Leiters, der Natur der Feldsubstanz und von der Größe der Bahn ab. Nach obigem ist $N = L_s\, i =$ magnetisches Moment der Strombahn oder des betrachteten Teiles einer Leiterschleife. In unserem Beispiele ist L_s auch von der Windungsfläche f, der Zahl Z der Einzelwindungen, der Dichte, mit der sie nebeneinander angeordnet sind, $\frac{Z}{l}$ und μ abhängig.

21. Wechselstromkreis mit Widerstand und Selbstinduktion. Ohmsches Gesetz für Wechselstrom, Fig. 41. $J =$ der Länge der durch O und B gehenden gestrichelten Linie = Höchstwert des Stromes, d. h.: Wir tragen den Strom an irgend einer Stelle des Diagrammes von O aus auf. Der Wert der EMK ohne Selbstinduktion bei der Stromstärke J und dem Widerstand R ist nach dem Ohmschen Gesetze gleich $J\, R = \overline{O\, B}$.

Wir tragen $\overline{OB}$ auf der durch O und B gehenden gestrichelten Linie (der Stromstärke) auf, weil zwischen der Stromstärke und der Nutzspannung JR keine Phasendifferenz herrscht. JR stellt eben die Spannung dar, welche zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes erforderlich ist.

Die EMK der Selbstinduktion E_s wird um 90° in der Phase hinter J zurückbleiben, weil E_s den größten Wert erreicht, wenn die Stromstärke durch O hindurchgeht beziehungsweise die größte Änderung erfährt. Die Strom- und Spannungslinie, d. h. die J- und E_s-Linie haben demnach eine Phasenverschiebung von 90°, so zwar, daß im Vektordiagramm E_s auf J senkrecht steht. E_s kann demnach durch $\overline{OC}$ dargestellt werden. Ziehen wir $\overline{BD}$ senkrecht auf $\overline{OB}$, so stellt diese Gerade jene EMK der Wechselstrommaschine dar, welche

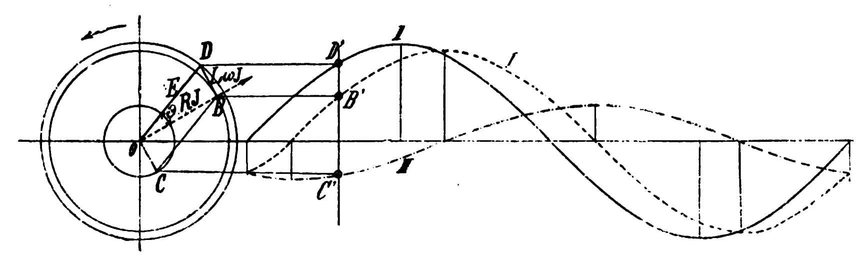


Fig. 41. Wechselstromkreis mit Widerstand und Selbstinduktion.

zur Tilgung der Selbstinduktion $\overline{OC}$ erforderlich erscheint. $\overline{OC}$ muß von O aus nach abwärts gerichtet sein, weil die EMK der Selbstinduktion in der Phase gegen den Strom zurück sein muß, da zunächst der Strom auftritt, welcher die Selbstinduktion hervorruft. Die EMK $\overline{BD}$ dagegen, welche zur Tilgung der EMK der Selbstinduktion $\overline{OC}$ verwendet wird, muß in der entgegengesetzten Richtung von $\overline{OC}$ auf $\overline{OB}$, also in der Richtung $\overline{BD}$ aufgetragen werden, da nur entgegengesetzt gerichtete EMK einander tilgen. Die zur Überwindung des Ohmschen Widerstandes erforderliche EMK $\overline{OB}$ und die EMK $\overline{BD}$, die zur Überwindung der Selbstinduktion notwendig ist, geben als Resultierende die EMK der Wechselstrommaschine $\overline{OD} = E$.

Eine Überlegung ergibt wohl, daß die EMK der Selbstinduktion $\overline{OC} = E_s$ den folgenden Faktoren proportional ist:

1. Koeffizient der Selbstinduktion $L_s = L$ (§ 20), welcher durch die Anzahl der Windungen, die Abmessungen und die magnetischen Eigenschaften des Eisens des ganzen Stromkreises bestimmt erscheint.

2. Stromstärke J.

3. Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{2\pi}{T}$, d. h.:

$$E_s = L\,\omega\,J.$$

Die Figur zeigt weiters, daß $\overline{OD}^2 = \overline{OB}^2 + \overline{BD}^2$ oder $E = \overline{OD} = \sqrt{\overline{OB}^2 + \overline{BD}^2}$. Setzen wir für $\overline{OB}$ und $\overline{BD}$ die obigen Werte ein, so erhalten wir:

$$E = \sqrt{R^2 J^2 + L^2 J^2 \omega^2} \text{ und } E = J\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \text{ oder}$$

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}.$$

Diese Gleichung kann man als das Ohmsche Wechselstromgesetz bezeichnen. Vergleichen wir dasselbe mit dem Ohmschen Gleichstromgesetze $J = \frac{E}{W}$ (I. T., 1 B., S. 22), so ist sofort ersichtlich, daß der Widerstand W durch den Widerstand $\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ ersetzt worden ist. Wenn wir in $\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ das Glied $L^2 \omega^2$ vernachlässigen, was dann mög-

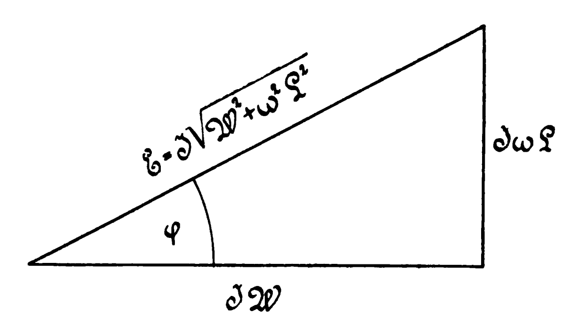


Fig. 42. Ohmsches Gesetz für Wechselstrom. $W = R$.

lich ist, wenn der Selbstinduktionskoeffizient den Wert 0 hat, so wäre dem Ohmschen Gleichstromgesetz entsprechend der Nenner $\sqrt{R^2}$ gleich dem Ohmschen Widerstande R. Wir sehen daraus, daß mit dem Auftreten von Selbstinduktion der Widerstand vergrößert erscheint.

Man nennt $\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$ = Impedanz = verzögernder oder scheinbarer Widerstand.

$L\omega$ = Induktanz nach Steinmetz.
= Reaktanz = induktiver Wstd.

Aus dem rechtwinkligen Dreieck ODB folgt:

$$tg\,\Theta = \frac{\overline{BD}}{\overline{OB}} = \frac{L\,\omega\,J}{J\,R} = \frac{L\,\omega}{R}, \text{ d. h.:}$$

Je kleiner der Widerstand R ist, desto größer ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Dasselbe ist ohneweiters auch

aus der Figur ersichtlich. Wir sind demnach in der Lage, durch ein Dreieck, z. B. $\overline{O\,B\,D}$, Fig. 41, die Beziehung zwischen treibender $O\,D = J\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$, wirksamer $O\,B = J\,R$ und gegenwirkender $E\,M\,K$ $B\,D = J\,\omega\,L$ und Phasenverschiebung Θ darzustellen. Fig. 42 zeigt ein ähnliches Dreieck herausgezeichnet.

Das Ohmsche Gleichstromgesetz läßt sich bekanntlich ebenfalls durch ein Dreieck darstellen. Setzt man z. B. in dem Dreiecke $O\,B\,D$, Fig. 41, $O\,B$ = Widerstand, $B\,D$ = Spannung, dann ist

$$tg\,\Theta = \frac{\overline{B\,D}}{\overline{O\,B}} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Widerstand}} = \text{Stromstärke, d. h.:}$$

Die Stromstärke und die Tangente des Winkels Θ sind einander gleich.

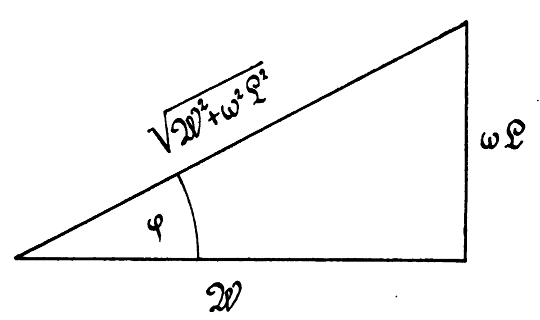


Fig. 43. Zerlegung des Widerstandes in Komponenten.

22. Erörterung des Ohmschen Gesetzes für Wechselströme.

Zerlegung des Widerstandes in Komponenten. Ähnlich so wie wir die an den Klemmen einer Drosselspule wirkende Spannung in zwei Komponenten zerlegt haben (21), können wir den Widerstand und den Strom in zwei Komponenten zerlegen. Dividieren wir, Fig. 42, die drei Seiten des rechtwinkligen Dreieckes durch J, dann erhalten wir ein neues Dreieck, Fig. 43, welches uns über die Widerstände einer Drosselspule Aufschluß gibt (I. T., 1. B., S. 128).

Zerlegung des Stromes in Komponenten. Wir haben die Spannung E, Fig. 42, welche an den Klemmen einer Drosselspule wirkt, in zwei Komponenten zerlegt, und zwar in die Komponenten $J\,W$ und $J\,\omega\,L_s$. Für die Leistung des Wechselstromes erhalten wir dann die Gleichung:

Watt effektiv $W_f = E\,J\cos\varphi = J\,(E\cos\varphi)$, worin $E\cos\varphi = J\,W$. Daher ist $W_f = J\,.\,J\,W$, d. h.:

Die Leistung eines Wechselstromes wird durch das Produkt aus der effektiven Stromstärke J in die wirksame effektive Spannung $J\,W$ dargestellt.

Auch die Stromstärke J. Fig. 44. kann man in zwei Komponenten J_n und J_μ zerlegen. Nach obigem ist $W = E J \cos\varphi = E (J \cos\varphi)$. Da $J \cos\varphi = J_n$ erhalten wir $W = E J_n$. Das Produkt $E J_n$ gibt demnach die Leistung an.

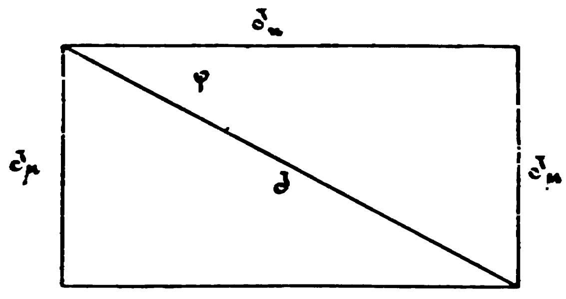


Fig. 44. Zerlegung des Stromes in Komponenten.

Die Leistung eines Wechselstromes wird durch das Produkt aus der effektiven Spannung E und der Nutzstromkomponente J_n dargestellt. In dem Produkte $E J_n$ kommt J_μ nicht vor, d. h. die Stromkomponente J_μ leistet keine Arbeit und wird deshalb wattlose Komponente oder Leerlaufskomponente genannt. Die Arbeit wird von der Komponente J_n geleistet, welche man als Nutzstrom- oder Wattkomponente bezeichnet. Die Wattkomponente J_n fällt im Vektordiagramm mit der Klemmenspannung E zusammen, denn $J_n = J \cos\varphi$.

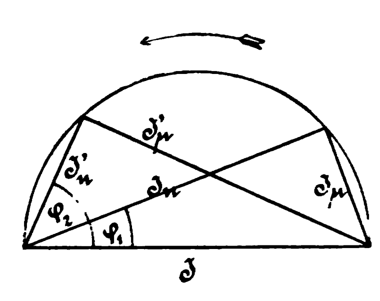


Fig. 45. Je kleiner die Wattkomponente ist, desto größer ist die Phasenverschiebung.

Schickt man einen Wechselstrom in eine induktionsfreie Spule (bifilare Wicklung ohne Eisen), so erhält man die Leistung auf dieselbe Weise wie bei Gleichstrom. Die Leistung ist also gleich der Stromstärke mal der Klemmenspannung. Daher $\cos\varphi = 1$, d. h. Strom und Spannung fallen in der Phase zusammen. Schickt man dagegen einen Wechselstrom in eine nicht induktionsfreie Spule (Eisen mit Windungen umgeben) mit sehr geringem Widerstande, so wird der in diesem Widerstande von dem Strome J geleistete Effekt verschwindend klein, daher $\cos\varphi = 0$ oder $\varphi = 90^0$. Man sieht aus Fig. 45 ohneweiters, daß φ immer größer wird, je kleiner J_n ist. Hat der $\sphericalangle\,\varphi$ den Wert φ_1, so ist $J_n = J_n$, hat der $\sphericalangle\,\varphi$ den Wert φ_2, so ist $J_n = J_n'$, wobei

$J_n > J_n'$. Mit dem Kleinerwerden von J_n nähert sich der $\sphericalangle\, \varphi$ immer mehr dem Werte von 90^0, bis er bei verschwindend kleinem J_n den Wert 90^0 erreicht; dann fällt der Strom J in die wattlose Komponente J_μ hinein.

Der Strom J_μ bringt demnach nur die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion hervor und hat keine Leistung. Die wattlose Komponente erzeugt demnach die Kraftlinien. Zumeist wirken in nicht induktionsfreien Widerständen beide Komponenten, da dieselben Widerstand und Selbstinduktion besitzen.

Wird der Widerstand in der Spule kleiner, so wird auch die Nutzstromkomponente kleiner und es bleibt schließlich, bei unendlich kleinem Widerstande, nur die wattlose Komponente übrig, weil dann das Produkt $J\,W = 0$ wird, denn $J\,W = 0$, wenn $W = O$.

In der Formel $W_f = E\,J \cos\varphi$ nennt man $\cos\varphi = \frac{W_f}{E\,J}$ den Leistungsfaktor. Für $\cos\varphi$ erhalten wir aus Fig. 43:

$$\cos\varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + \omega^2 L^2}}.$$

Aus dieser Formel kann man den Leistungsfaktor nicht berechnen. Diese Formel gilt nur ohne Eisen, also in einem nicht induktiven (induktionsfreien) Widerstande, denn es kommt in derselben kein J vor.

Schalten wir in eine Induktionsspule ein Wattmeter zum Messen der W_f, ein Elektrodynamometer zum Messen des Stromes J und einen Spannungszeiger zum Messen der Klemmenspannung E, so gelten die folgenden Beziehungen:

1. Leistungsfaktor $\cos\varphi = \frac{W_f}{E\,J}$, nicht aber

$$\cos\varphi = \frac{W}{\sqrt{W^2 + \omega^2 L^2}}.$$

2. Wattkomponente des Stromes $J_n = \frac{W_f}{E}$.

3. Wattlose Komponente, Fig. 44, $J_\mu^2 = J^2 - J_n^2$.

4. Elektromotorische Kraft der Selbstinduktion der Induktionsspule, Fig. 42, $J\,\omega\,L = \sqrt{E^2 - J\,W^2}$.

5. Verlust an Leistungen durch Stromwärme $= J^2\,W$ in Watt.

6. Verlust an Leistung durch Hysteresis und Wirbelströme $=$ $= W_f - J^2\,W$ in Watt.

23. Widerstände mit Selbstinduktion in Hintereinanderschaltung. Hat man mehrere *EMK* der Selbstinduktion hintereinander zu schalten, so summiert man dieselben, so wie oben (§ 8) er-

läutert wurde. Man schiebt deshalb die beiden EMK der Selbstinduktion $\overline{OB}$ und $\overline{BD}$, Fig. 46, ihrer Größe und Richtung nach aneinander. Die Resultierende $\overline{OD}$ gibt dann die EMK der Selbstinduktion beider

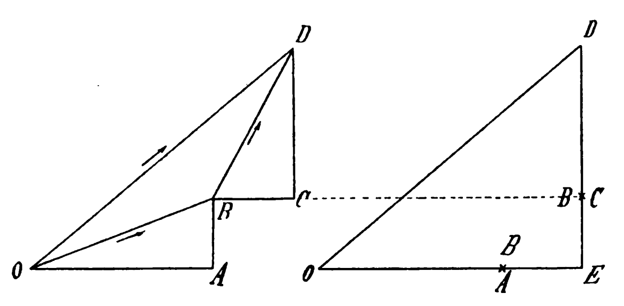


Fig. 46. Widerstände mit Selbstinduktion mit Hintereinanderschaltung. Fig. 47.

Widerstände mit Selbstinduktion. Noch einfacher kann man die Widerstände der beiden Apparate mit Selbstinduktion $\overline{OA}$ und $\overline{AE}$, Fig. 47, nebeneinander und darauf senkrecht die beiden Selbstinduktionen $\overline{EC}$ und $\overline{CD}$ auftragen. Die Resultierende $\overline{OD}$ gibt dann die resultierende EMK der Selbstinduktion.

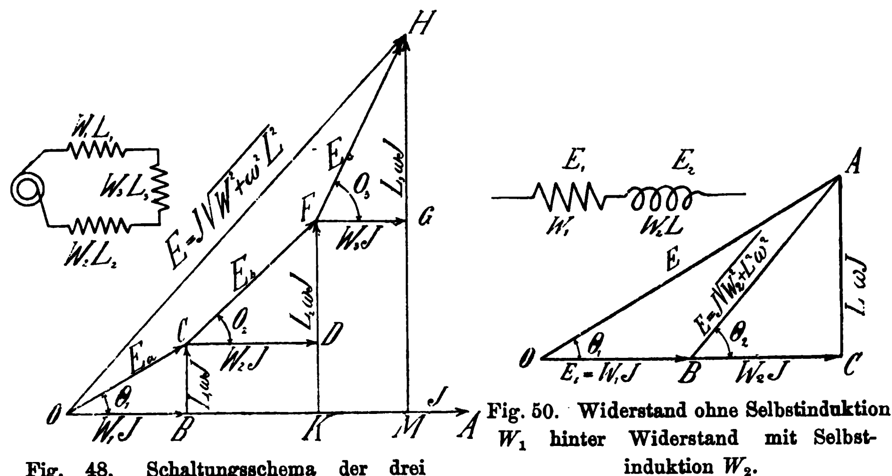


Fig. 48. Schaltungsschema der drei hintereinander geschalteten Induktionsvorrichtungen $W_1 L_1$, $W_2 L_2$ und $W_3 L_3$.

Fig. 49. Zeichnung der resultierenden EMK dreier Induktionsvorrichtungen.

Fig. 50. Widerstand ohne Selbstinduktion W_1 hinter Widerstand mit Selbstinduktion W_2.

Fig. 51. Zeichnung der resultierenden EMK der Selbstinduktion, wenn Widerstand W_1 hinter einen Widerstand W_2 mit Selbstinduktion geschaltet ist.

Fig. 48 stellt das Schaltungsschema dreier hintereinander geschalteter Induktionsapparate mit den Widerständen und Selbst-

induktionen W_1 L_1, W_2 L_2 und W_3 L_3 dar. Die zugehörige Konstruktion entsteht im wesentlichen gerade so wie jene in den Figuren 46 und 47. Aus der Figur 49 ist es ohneweiters klar, daß nach dem Pythagoräischen Lehrsatze[1]) in dem Dreieck OMH der scheinbare Widerstand

$$\sqrt{W^2 + \omega^2 L^2} = \sqrt{(W_1 + W_2 + W_3)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 + L_3)^2}.$$

Man kann sich demnach die drei Dreiecke OCB, CFD und FGH durch das Dreieck OHM ersetzt denken, da die Resultierende in beiden Fällen dieselbe ist.

24. Widerstand ohne Selbstinduktion hinter Widerstand mit Selbstinduktion.

Fig. 50 und 51 stellen den Fall dar, in welchem ein Widerstand ohne Selbstinduktion W_1 hinter einen Widerstand mit Selbstinduktion geschaltet erscheint. Die Konstruktion, Fig. 51, folgt aus den letzten drei Konstruktionen, Fig. 46, 47 und 49. Da E_1 keine Phasenverschiebung hat, wird die Strecke $\overline{OB}$ horizontal aufgetragen, daran schließt $E = J\sqrt{W_2{}^2 + L^2\omega^2}$ unter dem Winkel Θ_2. Für diesen Fall übergeht die obige Formel

$$\sqrt{(W_1 + W_2 + W_3)^2 + \omega^2 (L_1 + L_2 + L_3)^2}.$$

in die folgende: $\sqrt{(W_1 + W_2)^2 + \omega^2 L^2}$ = Impedanz.

Beispiel: In eine Wechselstrommaschine sei eine Bogenlampe samt Drosselspule hintereinander geschaltet. Gegeben sind:

Klemmenspannung der Wechselstrommaschine OA, Fig. 51, 40 Volt.

Periodenzahl 50.

Spannung an den Klemmen der Bogenlampe OB, Fig. 51, 30 Volt.

Stromstärke 10 Ampère.

Widerstand der Windungen der Drosselspule 0·5 Ohm.

Gesucht werden:

1. Elektromotorische Kraft der Selbstinduktion der Drosselspule AC, Fig. 51. $E_s = L\,\omega\,J = \sqrt{40^2 - (30 + 10 \times 0{\cdot}5)^2} = 19{\cdot}3649$ Volt.

2. Selbstinduktionskoeffizient der Drosselspule. Aus $E_s = L\,w\,J$ folgt $L = \dfrac{E_s}{\omega J} = \dfrac{19{\cdot}37}{10\,.\,2\pi\,.\,50} = 0{\cdot}0061$ Henry.

3. Spannung an den Klemmen der Drosselspule AB. Aus Fig. 51 folgt: $\overline{AB}^2 = 19{\cdot}37^2 + 5^2$, daher $AB = 20$ Volt.

4. Leistungsverlust in der Spule

$$W_f = E\,J\cos\varphi = J^2\,W = 10^2\,.\,0{\cdot}5 = 50 \text{ Watt}.$$

---

[1]) Im rechtwinkligen ebenen Dreieck ist das Quadrat der Hypotenuse gleich der Summe der Quadrate der beiden Katheten.



5. $\cos \Theta_1 = 35 : 40 = 0{\cdot}875$ und $\Theta = 60^0\ 30'$.
$\cos \Theta_2 = 5 : 20 = 0{\cdot}25$ und $\Theta_2 = 75^0\ 30'$.

25. Widerstände mit Selbstinduktion in Parallelschaltung. Zwischen zwei Punkten A und B seien zwei induktive Widerstände nebeneinander geschaltet; die Spannung zwischen A und B sei E.
1. Zweig: Widerstand R_1, Stromstärke J_1, Selbstinduktionskoeffizient L_1.
2. " " R_2, " J_2, " L_2.

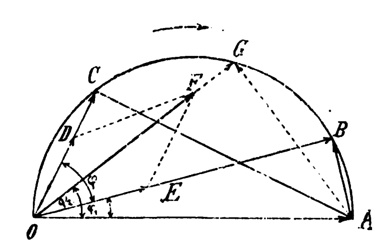


Fig. 52. Nebeneinanderschaltung zweier induktiver Widerstände.

Tragen wir die Spannung $E = \overline{OA}$, Fig. 52, auf eine Gerade, in irgend welchen Einheiten auf. $\overline{OA} = 42{\cdot}5\ mm$. Für $1\ mm = 1$ Volt entsprechen $42{\cdot}5\ mm$ einer Spannung von 42·5 Volt. Diese Spannung $\overline{OA}$ setzt sich in jedem Zweige aus zwei Komponenten zusammen, wovon je eine auf der anderen senkrecht stehen muß (22). Diese beiden Komponenten sind die *EMK* der Selbstinduktion und die durch den Ohmschen Widerstand getilgte Spannung; sie gehören einem rechtwinkligen Dreiecke an.

Sämtliche rechtwinklige Dreiecke aber, welche man mit OA als Hypotenuse zeichnen kann, liegen in einem Halbkreise, dessen Halbmesser $= \frac{\overline{OA}}{2}$ ist, Fig. 52. Zieht man diesen Halbkreis und trägt von $\overline{OA}$ aus den Winkel φ_1, die Phasenverschiebung des ersten Zweigstromes auf, so muß $\overline{OB} = J_1 R_1$ sein. Ebenso trägt man von $\overline{OA}$ aus den Winkel $(\varphi + \varphi_1)$ auf und dann ist für den zweiten Zweigstrom $\overline{OC} = J_2 R_2$. Dividiert man einerseits $\frac{J_1 R_1}{R_1}$ und $\frac{J_2 R_2}{R_2}$, d. h. dividiert man die Volt durch die Ohm, dann erhält man $\overline{OE}$ und $\overline{OD}$ die beiden Zweigströme und durch das Parallelogramm $OEFD$ die resultierende Stromstärke $\overline{OF}$.

Da die beiden Zweige nebeneinander geschaltet sind, muß E in den Zweigen denselben Wert haben und es folgt aus den Kirchhoffschen Gesetzen:

$$E = J_1 \sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2} = J_2 \sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \text{ oder}$$

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}} \text{ und } tg\, \varphi_1 = \frac{L_1 \omega}{R_1},\ tg\,(\varphi_1 + \varphi) = \frac{L_2 \omega}{R_2}.$$

Schließlich folgt aus der Figur $E = J \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ und $tg\, \varphi_2 = \frac{L \omega}{R}$.

Beispiel: Mit Berücksichtigung der Abmessungen der Figur 52 seien gegeben: $R_1 = 2{\cdot}64$ Ohm, $R_2 = 1{\cdot}58$ Ohm, $L_1\,\omega = 0{\cdot}7$, $L_2\,\omega = 3{\cdot}1$; φ_1, $\varphi_1 + \varphi$, J_1, J_2, J, W_1 und W_2 sind zu ermitteln.

$$tg\,\varphi_1 = \frac{L_1\,\omega}{R_1} = \frac{0{\cdot}7}{2{\cdot}64} = 0{\cdot}266;\ \varphi_1 \backsim 15^0.$$

$$tg\,(\varphi_1 + \varphi) = \frac{L_2\,\omega}{R_2} = \frac{3{\cdot}1}{1{\cdot}58} = 1{\cdot}96;\ \varphi_1 + \varphi \backsim 63^0.$$

Trägt man φ_1 und $\varphi_1 + \varphi$ von $\overline{OA}$ aus und schlägt über $\overline{OA}$ den Halbkreis, dann erhält man $\overline{OB} = J_1\,R_1 = 41$ Volt und $\overline{OC} = J_2\,R_2 = 19$ Volt; daraus und aus den Angaben folgt: $J_1 = \frac{41}{2{\cdot}64} = 15{\cdot}5$ Ampère und $J_2 = \frac{19}{1{\cdot}58} = 12$ Ampère. Zeichnet man deshalb über $\overline{OE} = 15{\cdot}5$ und $\overline{OD} = 12$ das Parallelogramm und mißt die Resultierende $\overline{OF}$ ab, so findet man $\overline{OF} \backsim 27$ *mm* $\backsim 27$ Ampère.

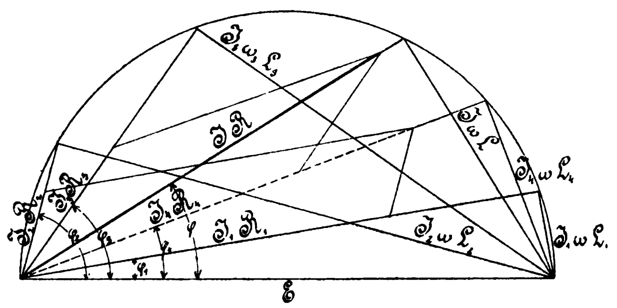


Fig. 53. Nebeneinanderschaltung dreier induktiver Widerstände.

Der scheinbare Widerstand $W_1 = \sqrt{R_1^2 + (L_1\,\omega)^2} =$
$= \sqrt{(2{\cdot}64)^2 + (0{\cdot}7)^2} = 2{\cdot}73$ Ohm.

Der scheinbare Widerstand $W_2 = \sqrt{R_2^2 + (L_2\,\omega)^2} =$
$= \sqrt{(1{\cdot}58)^2 + (3{\cdot}1)^2} = 3{\cdot}4$ Ohm.

Aus dem Dreiecke $O\,G\,A$ folgen die Gleichungen $\overline{OG} = J\,R =$ $= 34$ *mm* $= 34$ Volt und $\overline{AG} = J\,\omega\,L = 26$ *mm* $= 26$ Volt.

Da $J = 27$ Ampère, wird $R = \frac{34}{27} = 1{\cdot}26$ und $\omega\,L = \frac{26}{27} = 0{\cdot}9$.

Fig. 53 zeigt eine Nebeneinanderschaltung dreier induktiver Widerstände.

26. Kondensator im Wechselstromkreis. In dem Stromkreise einer Wechselstrommaschine befinde sich ein induktionsloser Widerstand W und ein Kondensator, dessen Kapazität $= C$ Farad. Die Vektoren, Fig. 54, drehen sich in der Richtung des eingezeichneten Pfeiles mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \frac{2\,\pi}{T}$. Das Dielektrikum wird dann

scheinbar von einem Strom J durchflossen, den wir uns als Vektor $\overline{OA}$ an irgend einer Stelle des Vektordiagrammes auftragen. Dieser Strom erzeugt in dem Widerstande W den Spannungsverlust $W.J$, welchen wir, da er mit dem Strome J gleiche Phase haben muß, auf $\overline{OA}$ auftragen und gleich $\overline{OB}$ annehmen wollen. Der Kondensator wird eine bestimmte Potentialdifferenz annehmen und wir wollen nachweisen, daß wir dieselbe durch $\overline{OD}$ darstellen können. Aus 22 folgt, daß Strom und EMK der Selbstinduktion aufeinander senkrecht stehen. Schalten wir nun in einen Telephonstromkreis eine Selbstinduktion oder einen Kondensator ein, dann wird das Gespräch undeutlich; schalten wir jedoch Selbstinduktion und Kapazität zugleich in den Telephon-

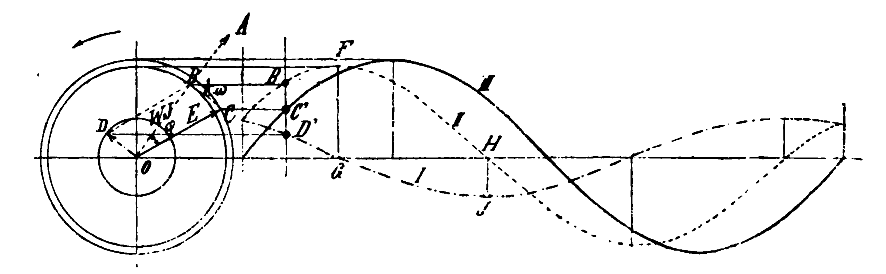


Fig. 54. Widerstand und Kapazität in Hintereinanderschaltung.

stromkreis, dann wird bei passender Wahl dieser Größen das Gespräch wieder deutlich, d. h.: Selbstinduktion und Kapazität heben einander auf. Aus diesem Grunde müssen wir diese beiden Größen im Diagramme in der entgegengesetzten Richtung auftragen. In Fig. 45 haben wir die EMK $\overline{OC}$ senkrecht nach abwärts auf den Strom errichtet, in Fig. 54 müssen wir demnach die EMK $\overline{OD}$ senkrecht und in der entgegengesetzten Richtung auf den Strom auftragen. Während demnach bei der Selbstinduktion die EMK um 90° hinter dem Strome zurückbleibt, eilt die EMK des Kondensators dem Strome um 90° voraus. Die EMK der Wechselstrommaschine, welche die Potentialdifferenz am Kondensator aufzuheben hat, kann man demnach in der entgegengesetzten Richtung von $\overline{OB}$, also in der Richtung $\overline{BC}$ auftragen. Eine Überlegung ergibt, daß die Potentialdifferenz am Kondensator $\overline{BC}$ der Stromstärke J gerade, der Kapazität C und der Winkelgeschwindigkeit ω dagegen verkehrt proportional ist,

$$\text{d. h.: } \overline{BC} = \frac{J}{\omega C}.\text{[1]}$$

[1]) Eine trigonometrische Ableitung dieser Formel gibt Thomas H. Blakesley. Die elektrischen Wechselströme, 1891, S. 18 bis 23.

Die Klemmenspannung der Wechselstrommaschine E setzt sich aus den beiden Komponenten $\overline{OB}$ und $\overline{BC}$ zusammen; sie entspricht demnach dem Vektor $\overline{OC}$. Aus Fig. 54 folgt:

$$E = \sqrt{\left(\frac{J}{\omega C}\right)^2 + (J\ W)^2} = J\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 + W^2} \quad \text{und}$$

$$J = \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega C}\right)^2 + W^2}}.$$

Man kann diese Formel als das Ohmsche Gesetz für obigen Kondensatorstromkreis bezeichnen. In dem Dreiecke OBC ist

$$\text{schließlich } tg\,\varphi = \frac{\overline{BC}}{\overline{BO}} = \frac{\frac{J}{\omega C}}{J\ W} = \frac{1}{\omega C W}.$$

Fig. 54 stellt links das Vektor-, rechts das Wellendiagramm dar. Im Vektordiagramme versinnlichen $\overline{OD} = \overline{BC}$, $J\ W$ und E Höchstwerte. Die augenblicklichen Werte dieser Größen innerhalb einer halben Periode erhält man, wenn man das Parallelogramm $O\ D\ B\ C$ einmal um den Punkt O herumdreht und die Vektoren $\overline{OD}$, $\overline{OB}$ und $\overline{OC}$ auf die durch O gezogene Ordinatenachse projiziert. In der Figur erscheinen $\overline{OD}$, $\overline{OB}$ und $\overline{OC}$ auf die Ordinatenachse $B\ C'\ D'$ projiziert und die Abstände der Punkte D' C' und B von der Abszissenachse, der Horizontalen durch O, sind die augenblicklichen Werte (die Projektionen). Der rechte Teil der Figur 54 veranschaulicht das Wellendiagramm. In diesem Diagramme verstehen wir unter der Linie *III* die Klemmenspannung der Wechselstrommaschine, unter *II* die Linie der Spannung $W\ J$ und unter der Linie *I* die Kondensatorspannung. In dem Bilde soll die Linie *III* der Differenz der Linien *II* und *I* gleich sein, wenn man die Wellenlinie *I* mit entgegengesetzten Zeichen nimmt.

27. Drehfeld,[1]) Fig. 55 bis 59. Durch Gleichstrom erhält eine in der Nähe befindliche Nadel eine feste Einstellung. Bringt man eine Magnetnadel in die Nähe eines von Wechselstrom durchflossenen Leiters und ist die Wechselzahl sehr groß, so wird die Nadel keine Ablenkung erfahren, weil die Nadel den rasch aufeinanderfolgenden Wechseln nicht zu

[1]) In einfachster Weise kann man sich ein Drehfeld dadurch entstanden denken, daß man sich in Fig. 56 (rechter Teil) die Magnetnadel *n s* durch einen Magnetstab ersetzt denkt, welcher um seinen Mittelpunkt rotiert. Dann entsteht in dem Ringe ein Drehfeld.

folgen vermag. Ist die Anzahl der Polwechsel der Wechselstrommaschine sehr gering, so kommt die Nadel in eine hin- und hergehende (pendelnde) Bewegung. Bei sehr geringer Wechselzahl, die allerdings in der Praxis nicht angewendet wird, endlich folgt die Nadel den einzelnen Wechseln. Durch ein Drehfeld dagegen wird die Nadel in eine drehende (rotierende) Bewegung versetzt. Mit Hülfe der folgenden Figuren 55 bis 59 soll nun das Drehfeld erklärt werden. Fig. 55 veranschaulicht

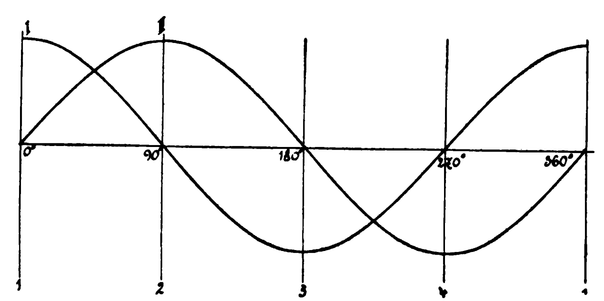


Fig. 55. Je eine Periode zweier Wechselströme von 90° Phasendifferenz.

je eine Periode zweier um 90° in der Phase gegeneinander verschobene Wechselströme *I* und *II*. Dieselben seien einer Zweiphasenmaschine, linker Teil der Figur 56, entnommen und treten in die Windungen eines kreisförmigen Eisenringes, rechter Teil derselben Figur, ein. Wir wollen nun zunächst die Augenblicke 1, 2, 3 und 4, Fig. 55, näher besprechen.

Augenblick 1. Aus Fig. 55 ist es ersichtlich, daß in dem Augenblicke 1 der Wechselstrom *I* seinen + Höchstwert, der Wechsel-

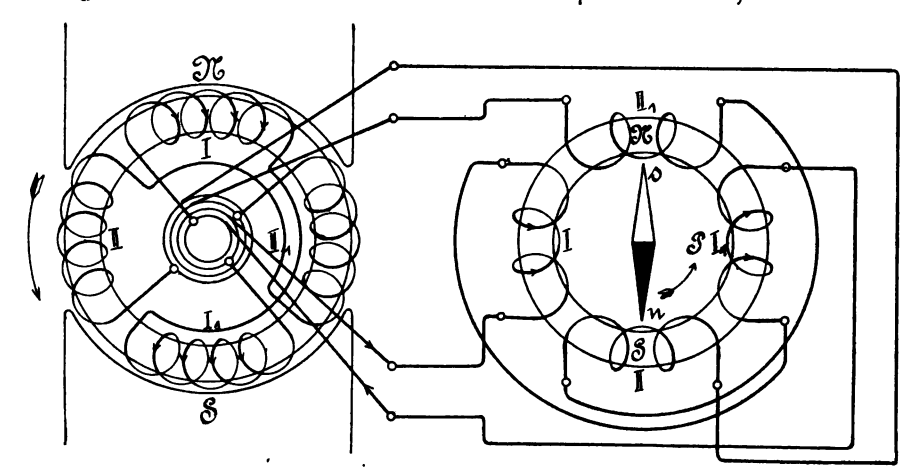


Fig. 56. Drehfeld. Augenblick 1.

strom 2 seinen kleinsten (Null-)Wert erreicht. Diesem Augenblicke entspricht Fig. 56. Da sich zu dieser Zeit die zwei Spulen der Phase I vor den Polschuhen N und S der Wechselstrommaschine (linker Teil der Figur) befinden, erhält nur diese Phase Strom. Nach der Stromrichtungsregel (S. 5) gilt die eingezeichnete Stromrichtung. Der erzeugte Strom tritt in die Windungen $I\,I_1$ des Ringes (rechter Teil der Figur 56) ein und bildet oben einen Nordpol N und unten einen Südpol S, wie es sich leicht mit Hülfe der rechten Handregel (I. T., 1. B., S. 46) bestimmen läßt. Die Magnetnadel *n s*, Fig. 56, stellt sich demnach in die in der Figur eingezeichnete Richtung ein.

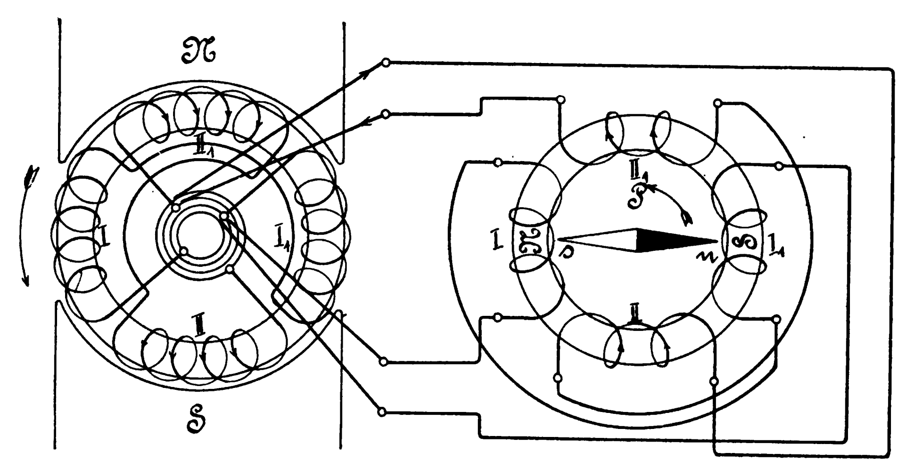


Fig. 57. Drehfeld. Augenblick 2.

Augenblick 2. In dem Augenblicke 2, Fig. 55, also nach einer $^1/_4$ Periode, hat der Strom I den Wert Null, der Strom II dagegen seinen $+$ Höchstwert. Diesem Augenblicke entspricht Fig. 57. In demselben befinden sich die zwei Spulen $II\,II_1$ von den Polschuhen N und S der Wechselstrommaschine (linker Teil der Figur 57). Es erhält daher nur Phase $II\,II_1$ Strom. Die Stromrichtung bestimmt die Stromrichtungsregel (S. 5). Der Strom bildet in dem Ringe (rechter Teil der Figur 57) links einen Nordpol N und rechts einen Südpol S und die Magnetnadel *n s* stellt sich horizontal und hat sich demnach in einer $^1/_4$ Periode um 90^0 gedreht.

Augenblick 3. In dem Augenblicke 3, Fig. 55, besitzt der Strom I den — Höchstwert, der Strom II den Wert 0 und es gilt Fig. 58. Die zwei Spulen der Phase $I\,I_1$ befinden sich vor den Polschuhen N und S und es fließt demnach in dem Ringe der Strom in

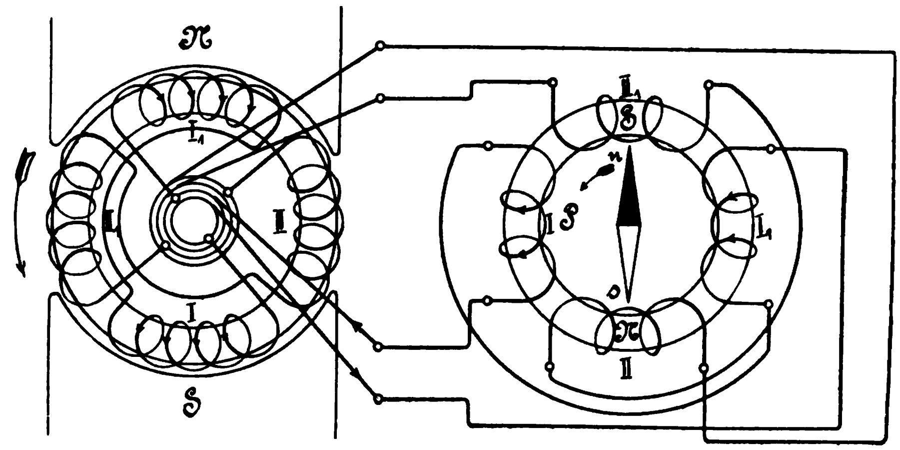


Fig. 58. Drehfeld. Augenblick 3.

der eingezeichneten Richtung. Der Ring nimmt unten einen Nordpol *N*, oben einen Südpol *S* an und die Magnetnadel *n s* stellt sich lotrecht, hat sich demnach um 60° in der Richtung des Pfeiles *P* weiter gedreht.

Wie man aus der Figur 55 ersieht, hat der Strom in Phase *I* in den Augenblicken 1 und 3 entgegengesetzte Richtung. Zu den Augenblicken 1 und 3 gehören aber die Figuren 56 und 58. Man ersieht

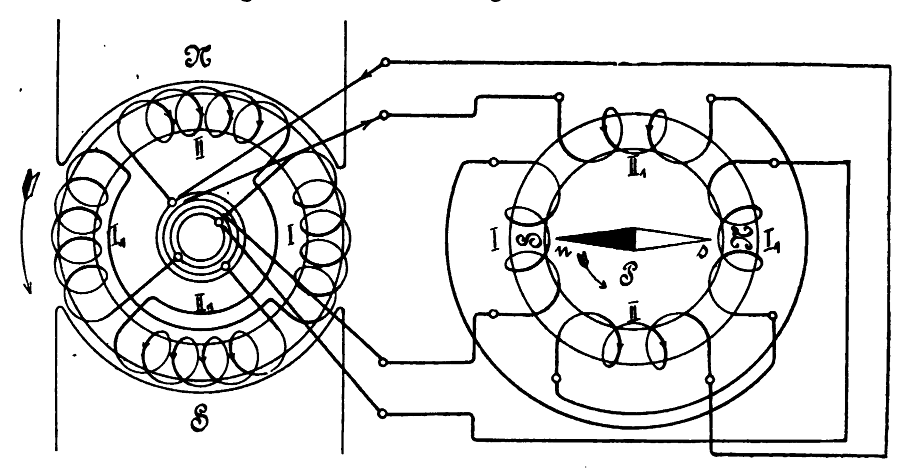


Fig. 59. Drehfeld. Augenblick 4.

deshalb auch aus diesen Figuren, und zwar aus deren rechten Teilen (den Ringen), daß der Strom in den Windungen des Ringes Fig. 56 in der Phase $I\,I_1$ von links nach rechts, dagegen in den Windungen des Ringes Fig. 58 in der Phase $I\,I_1$ von rechts nach links fließt, also in den beiden Figuren 56 und 58 entgegengesetzte Richtungen hat.

Augenblick 4. Jetzt hat der Wechselstrom *I*, Fig. 55, den Wert 0, der Wechselstrom *II* den — Höchstwert. Dieser Augenblick ist durch die Figur 59 wiedergegeben. Die Spulen $II\ II_1$ befinden sich vor den Polen *N* und *S* der Wechselstrommaschine (linker Teil der Figur 59), der Strom fließt nach der Stromrichtungsregel (1) im Ringe (rechter Teil derselben Figur) in der eingezeichneten Richtung. Im Ringe bildet sich links der Südpol *S*, rechts der Nordpol *N* und die Nadel *n s* stellt sich in die Richtung dieser Pole, also wagrecht ein. Die Nadel *n s* hat sich demnach in der letzten $^1/_4$-Periode um 60° in der entgegengesetzten Richtung der Uhrzeigerbewegung, Pfeil *P*, weiter gedreht. In den zwischenliegenden Augenblicken nimmt die Nadel *n s*

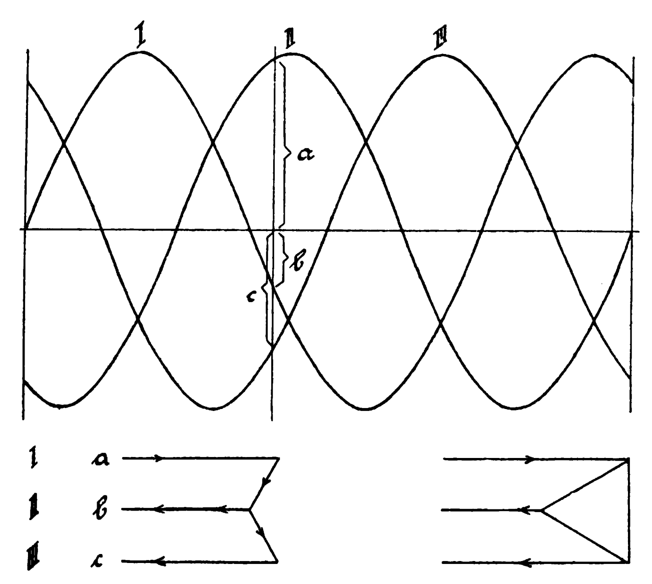


Fig. 60. Drei um 120° gegeneinander verschobene Wechselströme.

Zwischenstellungen zwischen den hervorgehobenen vier Augenblicken 1, 2, 3 und 4, Fig. 55, ein. Die Magnetnadel *n s* dreht sich demnach in jeder $^1/_4$-Periode um 90° weiter, macht also während einer Periode eine ganze Umdrehung. Die Magnetnadel zeigt demnach in jedem Augenblicke die Richtung des magnetischen Feldes an. Weil sich das magnetische Feld fortwährend dreht, nennt man dasselbe nach v. Dolivo-Dobrowolsky ein Drehfeld. Ähnlich erklärt man das Drehfeld bei Dreiphasenstrom.

28. Darstellung des Stromverlaufes und der Richtung der Mehrphasenströme. Die Lösung der Aufgabe, die drei Wechselströme,

Fig. 60, objektiv zu veranschaulichen, ist H. Behrend[1]) in äußerst einfacher Weise gelungen. Die hiezu erforderliche Vorrichtung besteht aus zwei kreisförmigen Scheiben aus Kartonpapier, Fig. 61 und 62. Die beiden Scheiben, welche in den Bildern nebeneinander erscheinen, befinden sich beim Versuche so übereinander, daß sie sich vollständig decken. Die untere Scheibe, Fig. 61, zeigt zwei sich berührende gleichgroße Kreisflächen in verschiedenen Farben (z. B. blau und rot). Die obere Scheibe, Fig. 62, ist an drei um 120° gegeneinander verschobenen Stellen geschlitzt. Nun befestigt man beide Scheiben durch eine Stecknadel, welche durch die Mittelpunkte der großen Scheibenflächen führt, auf einem Brett (Tafel). Die drei Schlitze sind auf verschiedene Längen gefärbt. Durch Drehung der unteren Scheibe ändert sich sowohl die Länge der farbigen Streifen als auch ihre Färbung (blau oder rot). Die Längen der einzelnen Färbungen stellen die Stromstärken, die Färbungen die Richtungen der Ströme vor. Bringt man in

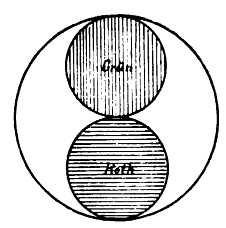


Fig. 61. Vorrichtung von H. Behrend. Untere Scheibe.

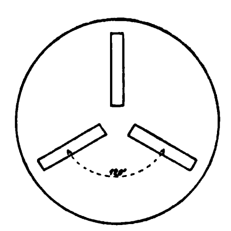


Fig. 62. Vorrichtung von H. Behrend. Obere Scheibe.

der oberen Scheibe anstatt drei nur zwei Schlitze an, welche nicht um 120°, sondern um 90° gegeneinander verstellt sind, dann versinnlicht diese neue Vorrichtung den Stromverlauf zweier um 90° gegeneinander in der Phase verschobener Wechselströme.

In Fig. 60 kann man für bestimmte, augenblickliche Werte der Dreiphasenströme *a b c* z. B. sofort die augenblickliche Stromstärke und Richtung angeben. Für die Werte *a b c* im Wellendiagramme, Fig. 60, ergeben sich für Sternschaltung die Richtungen in der kleinen Skizze der Figur 60 links unten, für Dreieckschaltung in der kleinen Skizze der Figur 60 rechts unten.

Vorrichtung zur Darstellung ein- und mehrphasiger Ströme.

Es gelingt mit verhältnismäßig einfachen Mitteln die Intensitätsschwankungen der einzelnen Ströme eines Drehstromes zu veranschaulichen. Ein bekanntes Mittel hiezu ist die Behrendsche Scheibe, Fig. 61 und 62. Solche Darstellungen sind von großem Werte, da sie gestatten, sich ein Bild von den Vorgängen in Drehstromapparaten zu machen. Im

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1891, Heft 34.

folgenden soll eine von Alfred Weber[1]) herrührende Abänderung der Behrendschen Scheibe und eine von Josef Löwy gebaute Drehvorrichtung beschrieben werden, welche dem gleichen Zwecke wie die Behrendsche Vorrichtung dienen soll. Auf einer kreisförmigen Scheibe S, Fig. 63, wird ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit dem Mittelpunkte O angenommen. In diesem Achsensystem werden die beiden Kreise K und K_1 angenommen. Nun wird durch den Punkt O eine Reihe von Kreisdurchmessern gezeichnet. Diese Durchmesser sind für den Kreis K Sekanten. Betrachten wir das Dreieck OAB. Die Seite OA stelle den Höchstwert J der darzustellenden Wechselströme vor. Die Sekante OB hat dann den Wert $J \sin \alpha$. Für die verschiedenen Sekanten nimmt der Winkel α alle Werte an von 0° bis 90° an, entsprechend dem Halbkreise OBA und die Werte von 90° bis 0° entsprechen dem Halbkreise ACO. Die aufeinanderfolgenden Werte der Sekanten entsprechen also den aufeinanderfolgenden Stromwerten der Halbperiode eines sinusförmig verlaufenden Wechselstromes, dessen Formel (S. 13) ja lautet $i = J . \sin \alpha$. Tragen wir nun die einzelnen Sekanten auf den

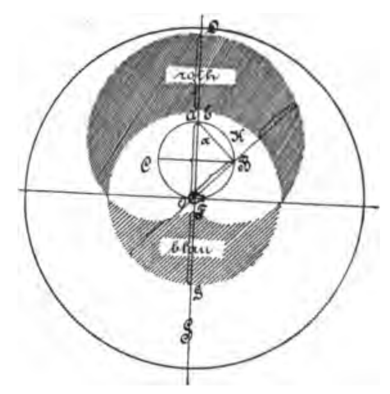


Fig. 63. Darstellung von Wechselströmen. Der Buchstabe K_1 für den Kreis mit dem Mittelpunkte O fehlt.

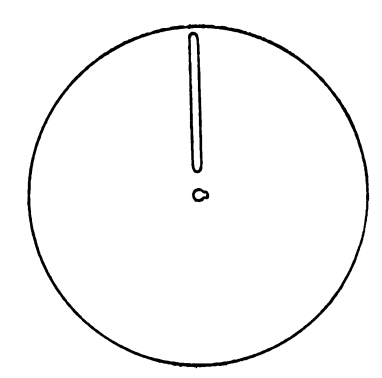


Fig. 64. Scheibe zur Darstellung von Einphasenstrom.

Verlängerungen der Sekantenlinien von der Peripherie des Kreises K_1 so auf, daß wir diese Werte von der Peripherie K_1 oberhalb der Abszissenachse von ihr gegen den Außenrand der Scheibe und die gleichen Werte von der Peripherie K_1 unterhalb der Abszissenachse von ihr gegen das Zentrum O auftragen. Auf diese Weise entstehen zwei halbmondförmige Figuren. Die Abschnitte der vorhin bezeichneten Kreissekanten innerhalb dieser halbmondförmigen Figuren entsprechen den augenblicklichen Werten des Sinusstromes. Die Werte des Halbmondes oberhalb der Abszissenachse entsprechen einer Halbperiode, die Werte des Halbmondes unterhalb der Abszissenachse der zweiten Halbperiode. Die Flächen dieser Figuren werden nun mit verschiedenen Farben angelegt, die eine, etwa die obere rot, entsprechend der positiven Halbperiode, die untere blau, entsprechend der negativen Halbperiode. Legen wir jetzt über diese Scheibe eine zweite Scheibe, die Ausschnitte besitzt, wie es die Figuren 64 bis 66 zeigen, dann können wir leicht durch Drehen der oberen oder unteren Scheibe den Verlauf eines einphasigen Wechselstromes oder den gleichzeitigen Verlauf der beiden Ströme oder der drei Ströme eines zwei- oder dreiphasigen Drehstromes veranschaulichen. Die Scheibe Fig. 64 besitzt einen Ausschnitt, der eine derartige Lage auf der Scheibe hat

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift 1899, S. 309.

und eine solche Länge besitzt, daß er die Linie DE oder FG deckt, wenn die Scheibe auf die mit den halbmondförmigen Figuren versehene gelegt und in die entsprechende Lage gebracht wird. Der Ausschnitt hat also eine Länge, die dem Höchstwerte des Stromes entspricht. Wir wissen, daß ein Wechselstrom, wenn er die Windungen eines Solenoides oder in Wechselstrommotoren die Windungen eines Poles des Ständers durchfließt, ein Wechselfeld erzeugt, das ebenfalls einen sinusförmigen Verlauf zeigt. Wir können uns also auch unter den Sekanten die augenblicklichen Werte des Wechselfeldes vorstellen. Denken wir uns die obere, mit dem Schlitze versehene Scheibe um den Mittelpunkt gedreht, dann läßt dieser Ausschnitt die einzelnen augenblicklichen Werte des Wechselstromes oder Wechselfeldes sehen. Man wird also wahrnehmen, wie die positiven Stromwerte bis zu einem Maximum zunehmen, von diesem Punkte bis O abnehmen. Hierauf erscheinen die negativen Werte, die nicht nur durch ihre Farbe von den positiven Werten unterschieden sind, sondern auch dadurch, daß sie auf der entgegengesetzten Seite der als Abszissenachse für die Stromwerte dienenden Kreislinie K_1 liegen. Bei den Wechsel- oder Drehstrommotoren bleibt die Richtung der einzelnen Felder, welche bei letzteren Motoren das rotierende Feld erzeugen, unverändert dieselbe, nur die Feldintensität verändert sich. Wir tun

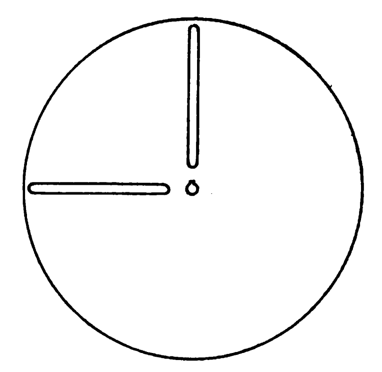


Fig. 65. Scheibe zur Darstellung von Zweiphasenströmen.

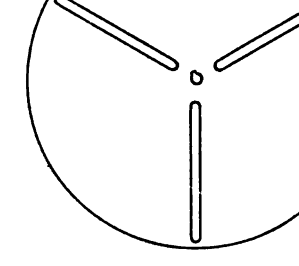


Fig. 66. Scheibe zur Darstellung von Dreiphasenströmen.

darum besser, bei der Darstellung der Veränderungen der Feldintensität nicht die obere Scheibe, sondern die untere zu drehen. Die unveränderte Lage des Ausschnittes kennzeichnet dann die Lage des Feldes, die im Ausschnitte der oberen Scheibe sichtbar werdende Sekantengröße die jeweilige Feldintensität, und die Farbe der Sekante die Richtung des Feldes. Die Scheibe Fig. 65 besitzt zwei im Winkelabstande von 90° befindliche Ausschnitte. Mit Hülfe dieser Scheibe können wir auf dem gleichen Wege wie früher den Verlauf der Ströme oder die Schwankungen der Felder eines zweiphasigen Wechselstromes darstellen, dessen Phasenströme einen Phasenunterschied von 90° besitzen. Die Scheibe Fig. 66 zeigt bei ihrer Verwendung die Strom- oder Feldschwankungen eines dreiphasigen Wechselstromes mit je 120° Phasenabstand zwischen den Strömen. Wir können natürlich ebenso leicht 4 und mehrphasige Ströme in ihrem Verlaufe veranschaulichen, wir brauchen nur an der Scheibe 4 oder mehr Ausschnitte anzubringen. In Fig. 67 ist die angegebene Vorrichtung dargestellt. Dieselbe besitzt zunächst 2 Wellen w und w_1. Auf der Welle w sitzen die untereinander gleichen Zahnräder R_1 und R_2. Das Zahnrad R_1 ist mit der Welle verkeilt, jedoch so, daß es auf diesem Keile so weit nach auswärts verschoben werden kann, daß es außer Eingriff

mit dem auf der Welle w_1 sitzenden Zahnrade R_2 gebracht werden kann. Auf der Welle w_1 sitzt auch das dem Zahnrade R_2 gleiche Rad R_4. Das Zahnrad R_3 sitzt auf einer Hülse, welche sich auf der Achse w lose dreht. An diesem Zahnrade ist die mit den halbmondförmigen Figuren versehene Scheibe S durch Verschraubung befestigt. Die vordere Scheibe S_1, welche die Ausschnitte besitzt, ist mit der Welle w verkeilt. Die Mutter M dient zum Festhalten der Scheibe. Will man die vordere Scheibe auswechseln, dann braucht man bloß die Mutter M abzuschrauben, worauf man die Scheibe S_1 leicht entfernen kann, da der Ausschnitt für den Keil an der Scheibe S_1 nur um etwas größer ist als der Keil selbst. Die auf der Welle w_1 sitzenden Zahnräder R_2 und R_4 sind beide mit der Welle fest verbunden. Die Kurbel K kann sowohl auf die Welle w als auch auf die Welle w_1 aufgesteckt werden. Die Schrauben s und s_1 dienen zum Festklemmen der Wellen w und w_1. Man kann nun mit Hülfe des Apparates die Scheiben S und S_1 auf folgende Arten bewegen:

1. Steckt man die Kurbel K auf die Welle w und bringt das Zahnrad R_1 außer Eingriff mit dem Rade R_2, dann bleibt beim Drehen der Kurbel die Scheibe S stehen, während sich die Scheibe S_1 bewegt.

2. Läßt man die Kurbel an der Welle w und rückt das Zahnrad R_1 ein, dann werden sich beim Drehen der Kurbel beide Scheiben mit gleicher Geschwindigkeit nach derselben Richtung drehen. Der Apparat bringt in diesem Falle etwa die Rotation von Magnetfeldern zur Darstellung, welche konstante, untereinander verschiedene Werte besitzen.

3. Rückt man das Zahnrad R_1 aus und setzt die Kurbel an die Welle w_1, dann bleibt die vordere Scheibe S_1 ruhig und die rückwärtige Scheibe S bewegt sich.

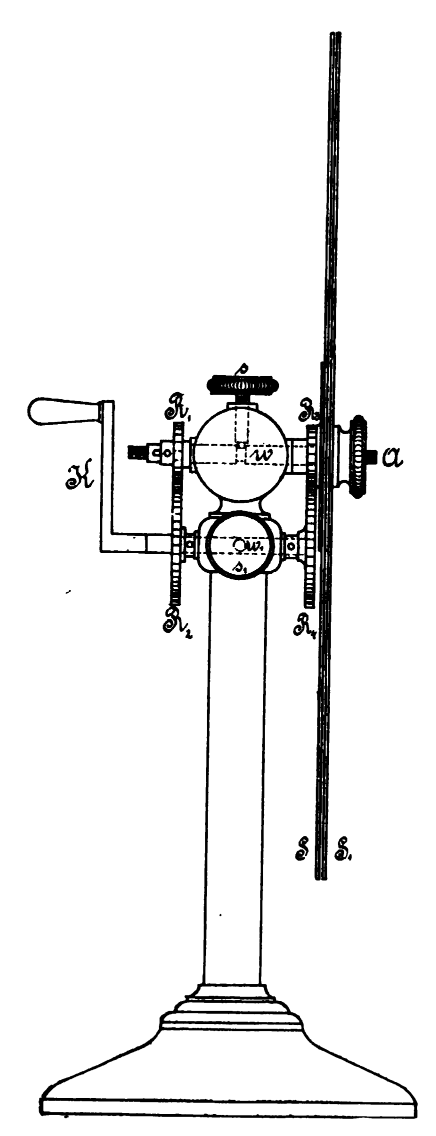
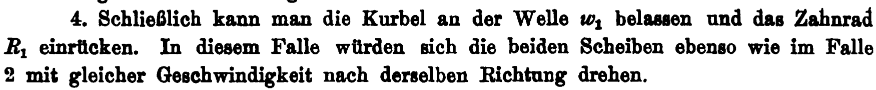


Fig. 67. Vorrichtung zur Darstellung von Wechselströmen u. s. w.



4. Schließlich kann man die Kurbel an der Welle w_1 belassen und das Zahnrad R_1 einrücken. In diesem Falle würden sich die beiden Scheiben ebenso wie im Falle 2 mit gleicher Geschwindigkeit nach derselben Richtung drehen.

Der Sockel des Apparates besteht aus Eisenguß, die Säule bildet ein Blechrohr, der Kopf ist Messingguß.

29. Die Schwankungen des Drehfeldes. Fig. 68 zeigt drei um 120° gegeneinander in der Phase verschobene Wechselströme *I*, *II* und *III*.

Zur Zeit t ist die Summe der Ströme I u. $II = 2 \sin 30^0 . i\ max. = 2 . 0{\cdot}5\ i\ max. = i\ max.$,

zur Zeit t ist der Strom $III = i\ max.$,

d. h. $I + II = III$.

Zur Zeit t_1 ist $I = 0$, $II = \sin 60^0\ i\ max.$, $III = \sin 60^0\ i\ max.$,

d. h. $I + II = III$ u. s. w. D. h. die Summe der drei Ströme ist in jedem Augenblicke gleich Null.

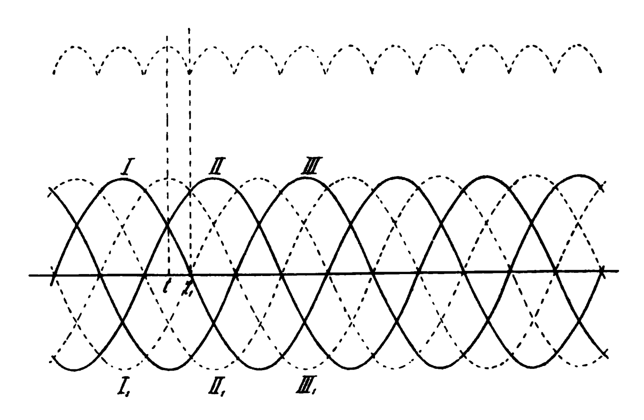


Fig. 68. Magnetisierende Kräfte im Dreiphasenmotor (120° Phasendifferenz).

Wir wollen nun die Schwankung der Summe der absoluten Beträge der drei Ströme (oder Spannungen), welche das Magnetfeld erzeugen, bestimmen. Aus der Figur 68 ersieht man, daß die Schwankungen zu den Zeiten t und t_1 verschiedene Werte zeigen, welche sich innerhalb weiterer gleicher Zeitintervalle regelmäßig wiederholen. Denn

zur Zeit t $2 \sin 30^0 .\ i\ max. = i\ max. + i\ max. = 2\ i\ max.$,

„ „ t_1 $\sin 0^0 + \sin 60^0\ i\ max. + \sin 120^0\ i\ max. = 2 \sin 60^0\ i\ max. = 2 . 0{\cdot}86603\ i\ max. \backsim 1{\cdot}732\ i\ max.$

Die Summe der absoluten Beträge der drei Ströme (oder Spannungen) schwankt zwischen $2\ i$ und $1{\cdot}732\ i$, also um 15% ihres Mindestwertes ($1{\cdot}732\ i$). Dasselbe Resultat erzielt man mit drei Strömen, welche sich um 60° in der Phase unterscheiden, Fig. 69. Durch eine der obigen Betrachtung ähnliche findet man, daß bei zwei Strömen mit 90° Phasendifferenz die Schwankung des Drehfeldes 40% beträgt (siehe auch

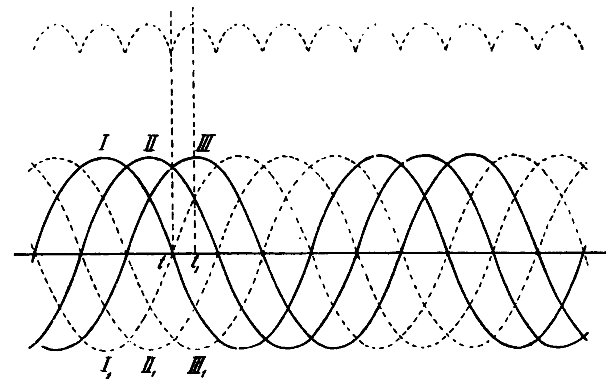


Fig. 69. Magnetisierende Kräfte im Dreiphasenmotor (60° Phasendifferenz).

Johann Sahulka[1]). Diese Schwankungen werden um so geringer, je größer die Anzahl der Phasen ist, und scheinen keinen schädlichen Einfluß auszuüben.

30. Ströme und Spannungen beim Dreiphasensystem.

a) Sternschaltung. Verbinden wir, Fig. 70, die Klemmen eines in Stern geschalteten Dreiphasengenerators durch drei ebenfalls

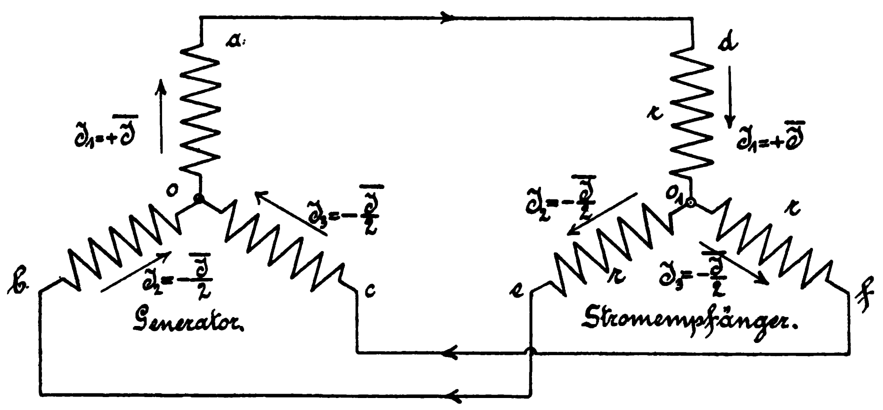


Fig. 70. Ströme bei der Sternschaltung. Augenblickliche Werte.

in Stern geschaltete Widerstände *r r r*, so erhalten wir, wenn wir den Augenblick, der in Fig. 71 zur Darstellung gelangt ist, herausgreifen, die Stromverteilung, die in Fig. 70 zum Ausdruck gebracht wird.

$\overline{J}_1 = \overline{J}_2 = \overline{J}_3 = \overline{J}$ bedeuten dabei die Höchstwerte, J_1, J_2 und J_3 die zeitlichen Werte der Ströme.

[1]) Johann Sahulka, Über Wechselstrommotoren mit magnetischem Drehfelde, Seite 13.

Wir wählen dabei als positive Stromgrößen diejenigen, welche in Fig. 71 oberhalb der Achse *I II* erscheinen, und treffen die Annahme, daß positive Stromwerte vom Knotenpunkte *O* des Generators, Fig. 70, wegfließend zu denken sind. Das Entgegengesetzte gilt von den negativen zeitlichen Stromgrößen. Im Stromempfänger ergeben sich dann entgegengesetzte Richtungen der Pfeile. Es ist ohneweiters einzusehen, daß die in Fig. 70 eingezeichneten Pfeile ihre Richtung so lange beibehalten, als J_2 und J_3 in Fig. 71 negativ bleiben, also von dem Zeitpunkte an, in welchem $\overline{J}_3$ an der Achse *I II* vorbeikommt und in den unteren Halbkreis eintritt, bis zu dem Augenblicke, in welchem $\overline{J}_2$ die Achse *I II* durchläuft, um in den oberen Halbkreis einzutreten. Dieser Zeitraum ist, da er einem Winkel von 60°, der bei der Drehung der

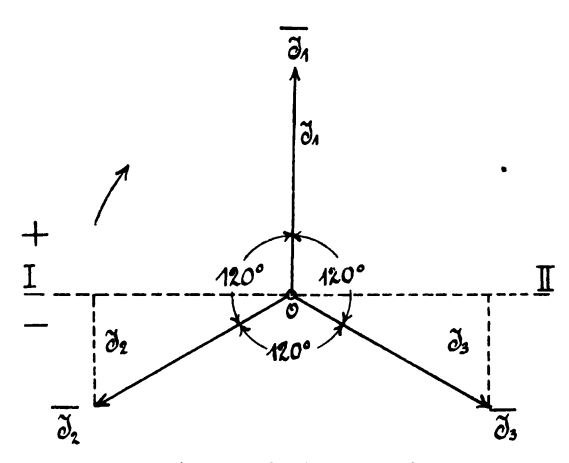


Fig. 71. Augenblickliche Werte der Ströme.

Vektoren im angedeuteten Pfeilsinne in Fig. 71 zurückgelegt werden muß, entspricht, der Dauer einer $^1/_6$-Periode gleich. Die Größe der Ströme ändert sich jedoch von Augenblick zu Augenblick, entsprechend der Bedingung, daß die Summe der zeitlichen Werte (nach dem Kirchhoffschen Gesetze) immer Null sei.

In dem Augenblicke, in welchem $\overline{J}_2$ in die Achse *I II* eintritt, wird $J_2 =$ Null und $J_1 = - J_3 = \overline{J} \,.\, sin\ 60^0 = \overline{J} \,.\, \frac{\sqrt{3}}{2}$. Tritt $\overline{J}_2$ über *I II* hinaus und in den oberen Halbkreis ein, so wird J_2 positiv. Während des Zeitraumes einer $^1/_6$-Periode haben dann J_2 und J_1 positiven Pfeilsinn in Fig. 71. Dann wird J_1 Null und J_2 behält allein durch eine $^1/_6$-Periode positive Richtung. Endlich wird J_3 gleich Null, hierauf J_2 und J_3 positiv (wieder während einer $^1/_6$-Periode)

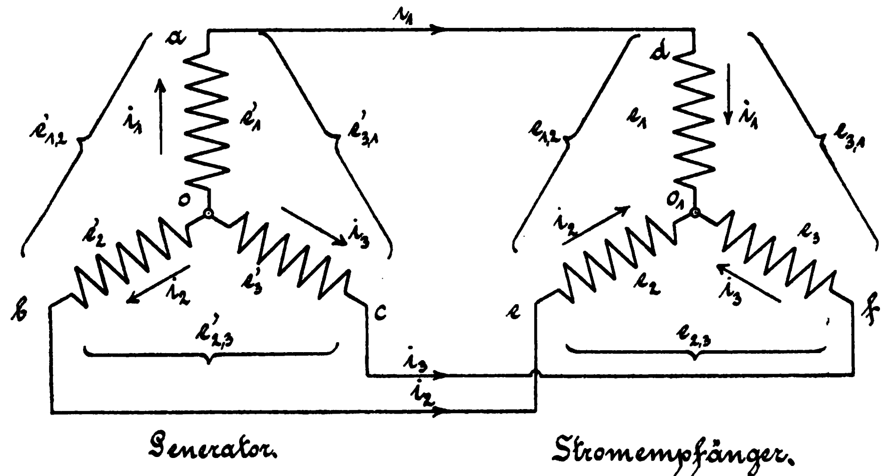


Fig. 72. Ströme und Spannungen bei der Sternschaltung. Effektivwerte.

und beim Eintritt von J_2 in den unteren Halbkreis bleibt, wieder 60° entsprechend, J_3 allein positiv. Es kommen also der Reihe nach die Ströme J_1, J_2 und J_3 in ganz gleicher Weise zur Wirkung. Da die Summe der Ströme immer Null sein muß, haben wir für die Spannungen, die ja nichts anderes darstellen als Stromstärke $\times$ Widerstand (beziehungsweise scheinbarer Widerstand bei induktiver Belastung) dieselbe Bedingung.

Wir gehen nun von den augenblicklichen Werten zu den Effektivwerten über und bezeichnen dieselben mit i_1, i_2 und i_3.

Sind in Fig. 72 und 73 i_1, i_2 und i_3 diese Effektivwerte, die bei gleicher Belastung der drei Phasen einander gleich sind, so erhalten wir, damit $i_1 + i_2 + i_3$ in Fig. 73 Null sei, offenbar den dort zum Ausdruck gebrachten Pfeilsinn. Es ist $i_1 + i_2 = - i_3$, und daher $i_1 + i_2 + i_3 = - i_3 + i_3$ = Null. Denselben Pfeilsinn haben wir für die einzelnen

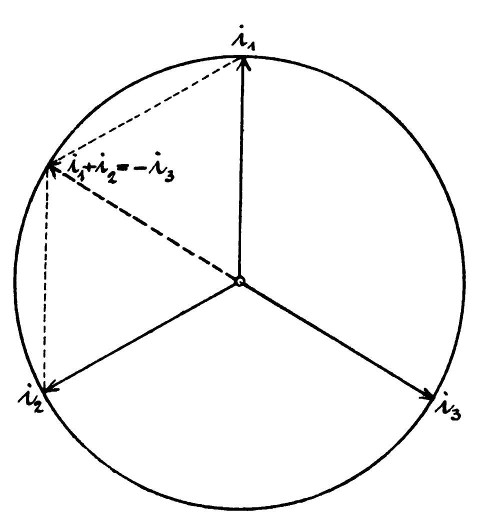


Fig. 73. Bestimmung der Stromrichtung. Sternschaltung.

Phasen in Fig. 72 zur Anwendung zu bringen. Ändern wir alle drei Pfeilrichtungen, indem wir überall entgegengesetzt gerichtete Pfeile einzeichnen, so bleibt zwar die Bedingung, daß die Summe aller Ströme im Knoten O, Fig. 72, beziehungsweise O_1 Null sei, aufrecht erhalten, wir wollen jedoch an den in Fig. 72 zum Ausdrucke gelangenden Pfeilrichtungen festhalten, entsprechend der Anschauung, daß die Ströme dem Stromempfänger zufließen.

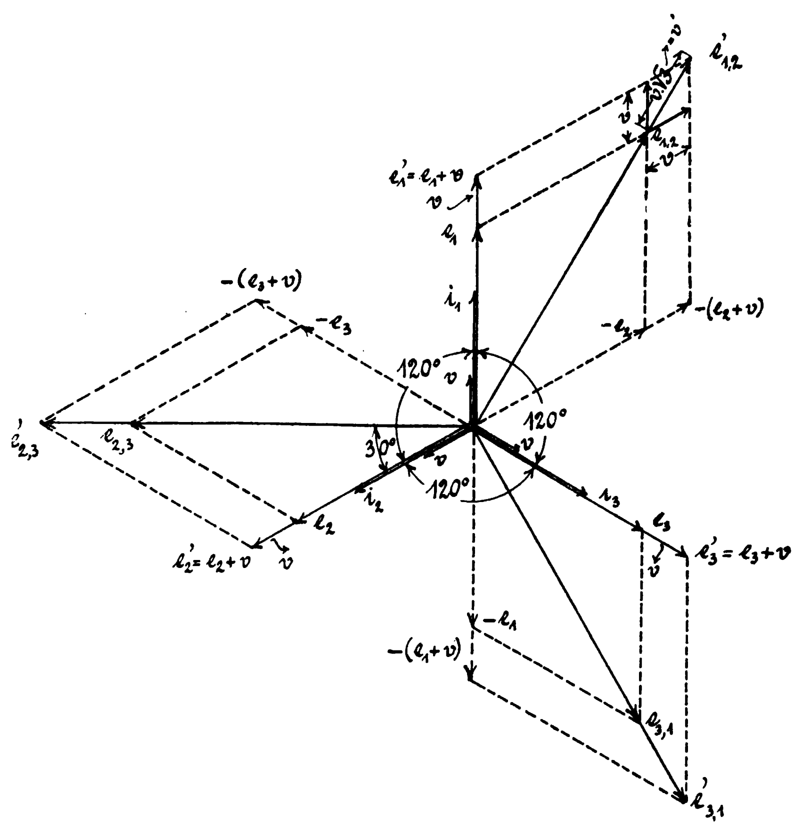


Fig. 74. **Ströme und Spannungen bei der Sternschaltung. Belastung induktionsfrei.**

Da an den Punkten a, b und c, Fig. 72, keine Stromverzweigung eintritt, haben wir in den Leitungen $a\,d$, $b\,e$ und $c\,f$ dieselben Ströme, die in den einzelnen Phasen vorhanden sind. Schalten wir in jede Leitung und in jede Phase einen Stromzeiger ein, so sind alle Ablesungen einander gleich und wir haben $i_1 = i_2 = i_3 = i$. Für die Spannungen jeder einzelnen Phase gilt dasselbe. Wir berücksichtigen vorläufig nur den Fall, daß die B e l a s t u n g i n d u k t i o n s f r e i s e i,

und bringen die bisher gewonnenen Resultate in Fig. 74 zur Darstellung.

Vergleichen wir Fig. 74 mit Fig. 72, so entspricht:

e_1 in Fig. 74 der Spannung beziehungsweise der Spannungsdifferenz zwischen den Punkten O_1 d in Fig. 72.

e_2 in Fig. 74 der Spannung beziehungsweise der Spannungsdifferenz zwischen den Punkten O_1 e in Fig. 72.

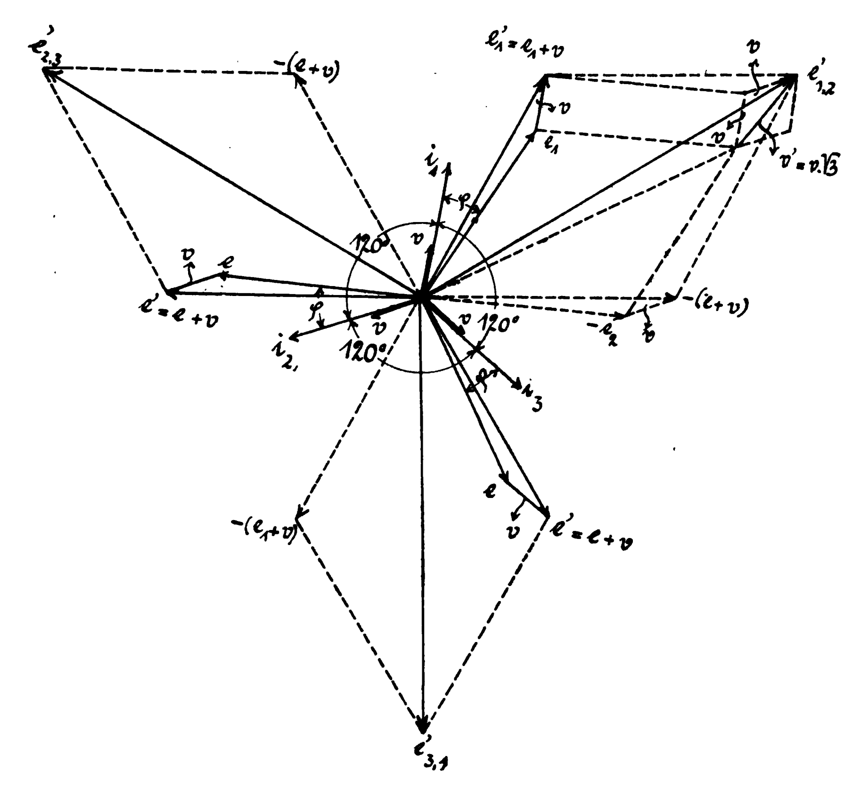


Fig. 75. Ströme und Spannungen bei der Sternschaltung. Belastung induktiv.

e_3 in Fig. 74 der Spannung beziehungsweise der Spannungsdifferenz zwischen den Punkten O_1 f in Fig. 72.

Um die Spannungen $e_{1,2}$, $e_{2,3}$ und $e_{3,1}$ zwischen den Punkten d e, e f und f d zu ermitteln, entnehmen wir aus Fig. 72 unter Anwendung des Kirchhoffschen Gesetzes:

$$e_{1,2} + e_2 - e_1 = \text{Null},$$
$$e_{2,3} + e_3 - e_2 = \text{Null},$$
$$e_{3,1} + e_1 - e_3 = \text{Null}.$$

Das $+$ Vorzeichen gilt für Pfeilrichtungen, die uns im Sinne der Summation begegnen, das — Vorzeichen für dem Sinne der Summation entgegengesetzte Pfeilrichtungen.

Wir erhalten daher:

$$e_{1,2} = e_1 - e_2 = 2\, e_1 \cos 30^0 = e_1 \sqrt{3},$$

wenn wir diese Subtraktion in Fig. 74 vornehmen. Desgleichen bekommen wir:

$$e_{2,3} = e_2 \sqrt{3} \text{ und } e_{3,1} = e_3 \sqrt{3}.$$

Die verkettete Spannung ist daher gleich der Phasenspannung mal $\sqrt{3}$.

Berücksichtigen wir den Spannungsabfall, der pro Leitungsdraht $i_1 \,.\, r = i_2 \,.\, r = i_3 \,.\, r = v$ Volt beträgt, wenn r den Widerstand pro Leiter $a\,d$, $b\,e$ oder $c\,f$ bedeutet, so erhalten wir auf ähnliche Weise (vergleiche Fig. 74 und 75):

$$e_{1,2}' = e_1' - e_2' = (e_1 + v) - (e_2 + v) = e_{1,2} + v \,.\, \sqrt{3} = e_{1,2} + v'.$$
$$e'_{2,3} = e_2' - e_3' = (e_2 + v) - (e_3 + v) = e_{2,3} + v \;\sqrt{3} = e_{2,3} + v'.$$
$$e_{3,1} = e_3' - e_1' = (e_3 + v) - (e_1 + v) = e_{3,1} + v \;\sqrt{3} = e_{3,1} + v'.$$

Bei gleicher Belastung aller drei Phasen ist naturgemäß

$$e_{1,2} = e_{2,3} = e_{3,1} \text{ und } e'_{1,2} = e'_{2,3} = e'_{3,1}.$$

Der Spannungsverlust v ist, da jeder zeitliche Wert desselben dem zugehörigen zeitlichen Stromwerte proportional ist, in gleicher Phase mit dem entsprechenden Strome und daher bei induktionsfreier Belastung auch in gleicher Phase mit e_1, e_2 und e_3. Die hier angedeuteten Rechnungsverfahren sind in Fig. 74 alle zur Darstellung gebracht.

Ist die Belastung induktiv, d. h. sind die Phasenspannungen e_1, e_2 und e_3 den Strömen i_1, i_2 und i_3 um einen gewissen Winkel φ in der Phase voraus, so erhalten wir, da v immer in der Phase des zugehörigen Stromes liegt, das Diagramm, Fig. 75.

Auch in diesem Falle ist v' immer gleich $v \,.\, \sqrt{3}$, liegt jedoch nicht in Phase mit der verketteten Spannung, wie das bei induktionsfreier Belastung der Fall ist.

Wir verlieren also in je zwei Linien $i_1 \,.\, r \cdot \sqrt{3}$ Volt. Die Spannung am Anfang der Leitung beträgt verkettet $e_1' \,.\, \sqrt{3}$ Volt. Mithin ist der prozentuale Spannungsverlust:

$$p = \frac{100 \,.\, i_1 \,.\, r \,.\, \sqrt{3}}{e_1' \,.\, \sqrt{3}} = \frac{100\, i_1 \,.\, r}{e_1'}.$$

Verwendet man die Sternschaltung für Beleuchtungszwecke und verteilt auf die drei Phasen Glühlampen, so muß wegen der immer unvermeidlichen Belastungsdifferenzen, die sich beim Ab- oder Zuschalten von Lampen in der einen oder anderen Phase ergeben, ein

Ausgleichsleiter, der die Punkte O und O_1, Fig. 76, verbindet, zur Anwendung gelangen.

Führen die drei Leitungen verschieden große Ströme, so wird auch der Spannungsverlust in jeder dieser drei Leitungen verschieden

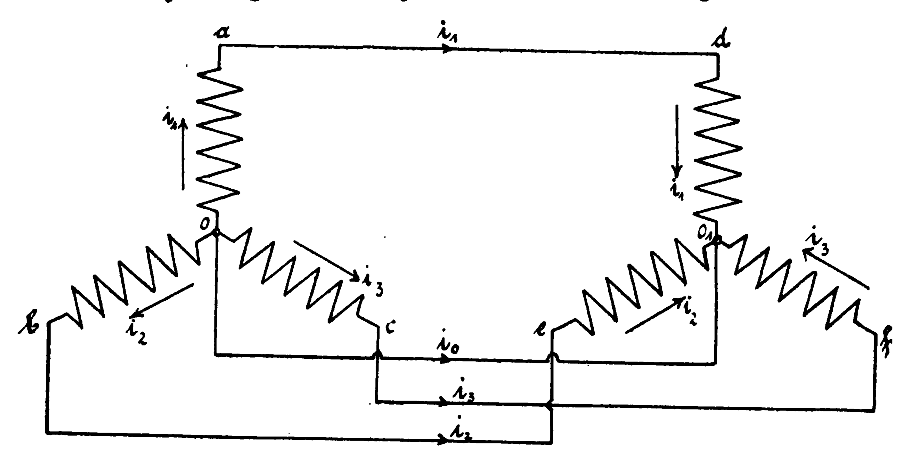


Fig. 76. Sternschaltung mit Ausgleichsleiter.

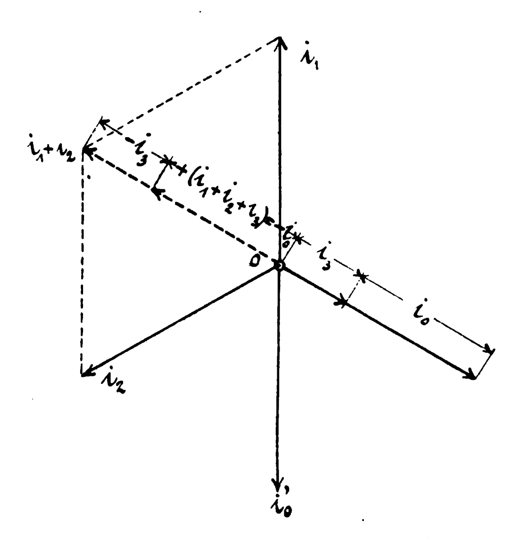


Fig. 77. Sternschaltung. Strom im Ausgleichsleiter.

groß ausfallen. Es werden daher auch die Spannungen e_1, e_2 und e_3 nicht mehr genau gleich groß sein können. Damit die geometrische Summe der drei Phasenspannungen Null ist, hatten wir bei $e_1 = e_2 = e_3$ Verschiebungswinkel von 120°. Bei verschieden großen Strömen in den einzelnen Phasen und dadurch bedingten verschieden großen Phasen-

spannungen können daher, damit die Summe dieser jetzt ungleich großen Spannungen e_1, e_2 und e_3 Null beträgt, die gegenseitigen Verschiebungswinkel nicht mehr 120° betragen. Es werden also, genau genommen, auch die Ströme nicht mehr unter 120° aufeinander folgen. Da der Spannungsverlust in der Regel nur 2—3% der Nutzspannung beträgt, kann aber dieser Umstand vernachlässigt werden. Wir nehmen also auch bei den verschieden großen Strömen je 120° Phasenverschiebungen und lassen in Fig. 76 den Strom i_3 kleiner werden. i_1 sei ferner gleich i_2. Nach Fig. 77 erhält man dann im Ausgleichsleiter einen Strom von der Größe und Richtung i_0. Es ist

$$\dot{i}_0 = \dot{i}_1 - \dot{i}_3 = \dot{i}_2 - \dot{i}_3,$$

wobei die angedeutete Subtraktion algebraisch aufzufassen ist. Die Richtung von i_0 ist dieselbe wie von i_3.[1]) Nur bei dieser Bestimmung

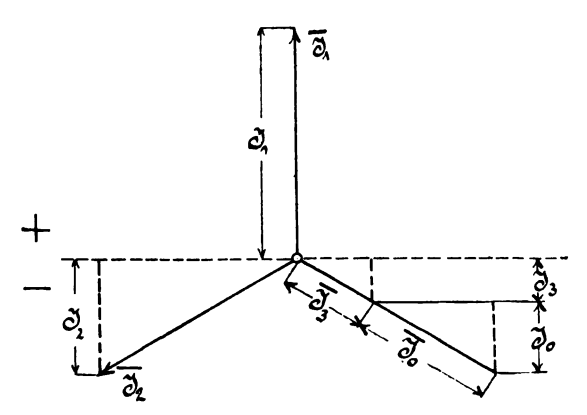


Fig. 78. Sternschaltung. Richtung des Ausgleichstromes.

von i_0 ist die Summe aller Ströme im Knoten O_1 gleich Null, eine Bedingung, die nach dem Kirchhoffschen Gesetz immer erfüllt sein muß. Aus Fig. 77 entnehmen wir, ganz allgemein geltend:

$$\dot{i}_0 = -(\dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3).$$

Lassen wir i_2 und i_3 Null werden, so tritt im Ausgleichsleiter ein Strom $i_0' = -(i_1 + i_2 + i_3) = -i_1$ auf. Wir haben also wieder die Bedingung erfüllt, daß die Summe der Ströme im Knoten O_1 Null ist. Für $i_2 = i_3 =$ Null muß auch nach einer anderen sehr einfachen Überlegung $i_0' = -i_1$ sein.

Wir können uns ja in diesem Falle die Phasen 2 und 3 ganz

[1]) Nach dem Gedankengange von Teichmüller, Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, Seite 31.

fortdenken. Es ist dann i_1 der zufließende und $i_0 = - i_1$ der abfließende Strom.

Diese Betrachtung galt für die Effektivwerte.

Fassen wir einen augenblicklichen Wert ins Auge und lassen wieder i_3, also auch $\overline{J_3}$ und J_3 kleiner werden, so gibt auf Grund der bisherigen Betrachtungen J_0 in Fig. 78 die in diesem Augenblick auftretende Größe und Richtung des Ausgleichstromes an. Nur bei dieser Richtung und Größe von J_0 ist das Kirchhoffsche Gesetz erfüllt.

Da sich J_0 im unteren Halbkreis befindet, d. h. negativ ist, würde der Ausgleichstrom in diesem Augenblick, entsprechend den bei Fig. 70

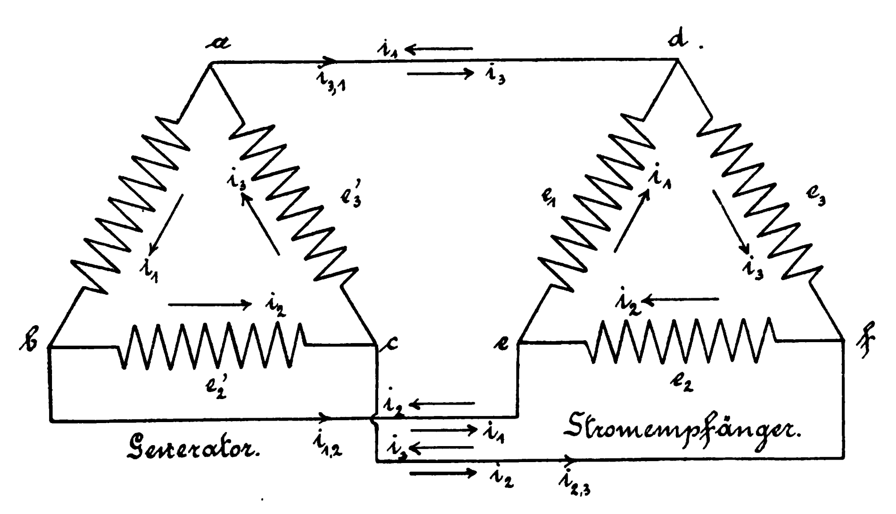


Fig. 79. Ströme und Spannungen bei der Dreieckschaltung.

und 71 getroffenen Annahmen, vom Stromempfänger zum Generator zurückfließen.

b) Dreieckschaltung. Bei Dreieckschaltung gilt für jede einzelne Phase bezüglich der augenblicklichen Werte dasselbe wie bei der Sternschaltung. Nur in den Leitungen selbst ist der Vorgang ein anderer, da wir es hier nicht mit verketteten Spannungen, sondern mit verketteten Strömen zu tun haben. Wir bezeichnen wieder mit i_1, i_2 und i_3 die effektiven Werte der Ströme einer Phase. Wir wollen nun nachweisen, daß die Stromverteilung so stattfindet, wie Fig. 79 zeigt. Es arbeitet jede einzelne Phase auf einem geschlossenen Stromkreis, und es entsteht daher in jedem Leitungsdraht die Differenz zweier Phasenströme, wie aus den eingezeichneten Pfeilrichtungen hervorgeht.

Betrachten wir den Knoten a, so erkennen wir, daß demselben die Ströme i_1 und i_3 zufließen. Da i_1 und i_3 aber wieder vom Knotenpunkte abfließen, ist dem Kirchhoffschen Gesetze Genüge geleistet. Was für den Knoten a gesagt wurde, gilt, wie aus Fig. 79 zu entnehmen ist, auch für jeden anderen Knotenpunkt. Wir erhalten nun für den Strom $i_{1,2}$ im Leiter $b\,e$:

$i_{1,2} = i_1 - i_2$, im Leiter $c\,f$:

$i_{2,3} = i_2 - i_3$ und im Leiter $a\,d$:

$i_{3,1} = i_3 - i_1$.

Diese Subtraktionen sind geometrisch auszuführen und zeigt Fig. 80 das entsprechende Diagramm. Wir erhalten:

$$i_{1,2} = 2 \,.\, i_1 \,.\, \cos 30^0 = i_1 \,.\, \sqrt{3},$$
$$i_{2,3} = 2 \,.\, i_2 \,.\, \cos 30^0 = i_2 \,.\, \sqrt{3},$$
$$i_{3,1} = 2 \,.\, i_3 \,.\, \cos 30^0 = i_3 \,.\, \sqrt{3}.$$

Da bei gleicher Belastung aller drei Phasen $i_1 = i_2 = i_3$ ist, sind in diesem Falle auch die Ströme in den Leitungen alle gleich groß. Wir erhalten also bei Dreieckschaltung das Ergebnis, daß die Ströme in den Leitungen gleich Phasenstrom mal $\sqrt{3}$ sind. Die Spannung zwischen zwei Leitungen ist, wie aus Fig. 79 ohneweiters hervorgeht, gleich der Phasenspannung. Diese Phasenspannungen e_1, e_2 und e_3, entsprechend den Punkten $d\,e$, $e\,f$ und $f\,d$, haben bei induktionsfreier Belastung gleiche Phase mit den Strömen i_1, i_2 und i_3.

Der Spannungsverlust für einen Draht ist bei einem Strome $i_{1,2}$ im Leiter gleich:

$$i_{1,2} \,.\, r = i_1 \sqrt{3} \,.\, r = v_{1,2}$$

und naturgemäß auch in Phase mit $i_{1,2}$. Da zu jeder Phase zwei Drähte gehören, ist auch, um die Spannungen e_1', e_2' und e_3' am Anfang der Leitung zu erhalten, der Spannungsabfall in dem zugehörigen zweiten Leiter zu berücksichtigen. Wir haben hier denselben Fall, den wir bei der Sternschaltung hatten. Hier handelt es sich in Fig. 80 um 2 um 120° verschobene Spannungsabfälle $v_{1,2}$ und $v_{3,1}$, wenn wir die zur Phase 1 gehörenden Drähte $a\,d$ und $b\,e$ betrachten. Bei der Sternschaltung hatten wir 2 um 120° versetzte Phasenspannungen e_1 und z. B. e_2, die sich zur verketteten Spannung $e_{1,2} = e_1 - e_2$ zusammensetzten. Hier haben wir einen verketteten Spannungsverlust v', der gleich $v_{1,2} - v_{3,1}$ ist. Nach Fig. 80 erhalten wir:

$$v' = 2 \,.\, v \,.\, \cos 30^0 = 2 \,.\, i_1 \,.\, \sqrt{3} \,.\, r \,.\, \frac{\sqrt{3}}{2} = 3 \,.\, i_1 \,.\, r.$$

e_1' wird bei induktionsfreier Belastung: $e_1' = e_1 + v'$.

Der Übergang auf induktive Belastung ergibt sich nach dem bei der Sternschaltung Gesagten von selbst.

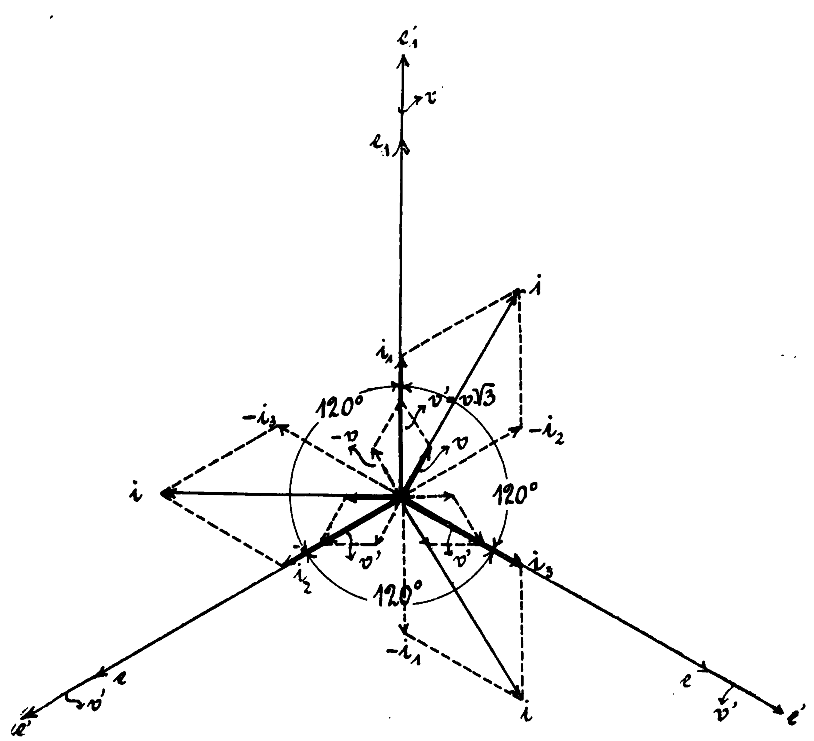


Fig. 80. Diagramm der Ströme und Spannungen. Dreieckschaltung.
Anstatt i lies links $i_{2,3}$, oben $i_{1,2}$ und unten $i_{3,1}$.

Bei der Dreieckschaltung verlieren wir also in 2 Drähten $3 . i_1 . r$ Volt und haben dabei eine Phasenspannung von e_1' Volt am Anfang der Leitung, die gleich der Spannung zwischen 2 Leitern ist. Wir erhalten daher für den prozentualen Spannungsverlust:

$$p_1 = \frac{100 . 3 . i_1 . r}{e_1'} = \frac{300 . i_1 . r}{e_1'} = 3\, p,$$

wenn p den prozentualen Spannungsverlust bei Sternschaltung bedeutet. Bei Übertragung derselben Leistung und bei gleich großer Phasenspannung ist daher, gleiche Leitungswiderstände vorausgesetzt, bei Dreieckschaltung der prozentuale Spannungsabfall dreimal größer als bei Sternschaltung.

Sind die Belastungen der einzelnen Phasen ungleich, so sind aus denselben Gründen, die bei der Sternschaltung angegeben wurden, die Verschiebungswinkel der Ströme und Spannungen genau genommen nicht mehr 120°.

Dieser Umstand kann jedoch wegen der geringen Größe der Spannungsverluste im Vergleich zur Verbrauchsspannung vernachlässigt werden. Wir nehmen daher an, daß auch bei ungleicher Belastung der

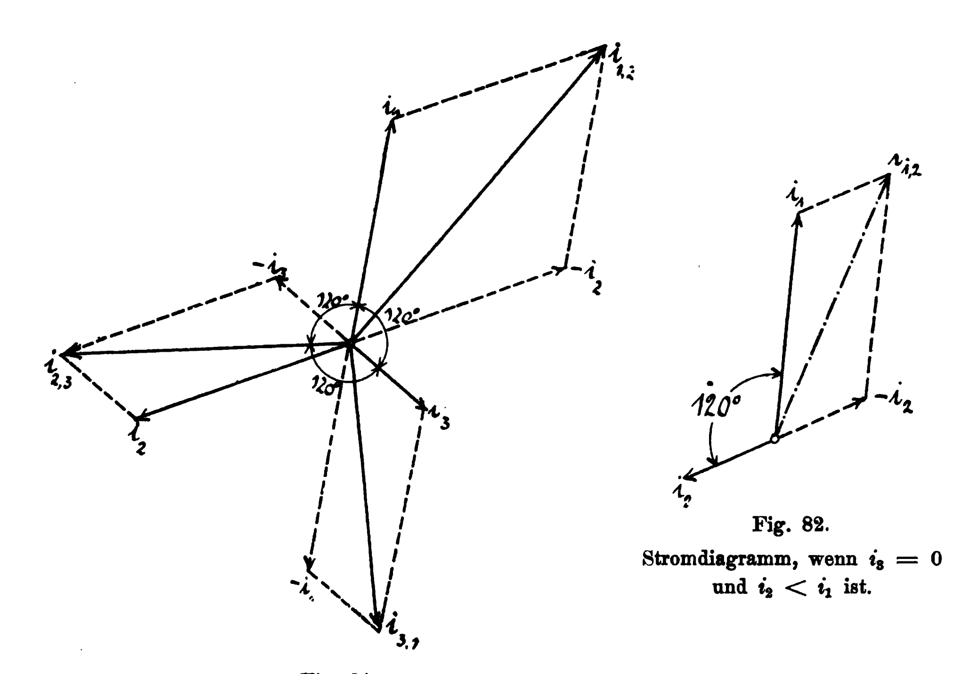


Fig. 82.
Stromdiagramm, wenn $i_3 = 0$ und $i_2 < i_1$ ist.

Fig. 81.
Stromdiagramm bei ungleicher Belastung der 3 Phasen.

3 Phasen die Ströme unter 120° aufeinander folgen, und erhalten dann, immer unter Berücksichtigung des Kirchhoffschen Gesetzes, für die Fälle in Fig. 81 und 82 folgendes:

In Fig. 81 ist $i_{3,1} = i_3 - i_1$ (Strom im Leiter a—d, Fig. 79),
$i_{2,3} = i_2 - i_3$ (Strom im Leiter c—f, Fig. 79),
$i_{1,2} = i_1 - i_2$ (Strom im Leiter b—e, Fig. 79).

In Fig. 81 wird angenommen, daß $i_1 = i_2$,
$i_3 < i_1$.

In Fig. 82 ist i_3 = Null und $i_2 < i_1$ angenommen worden.

Wir erhalten $i_{1,2} = i_1 - i_2$ (Strom im Leiter b—e, Fig. 79),
$i_2 =$ (Strom im Leiter c—f, Fig. 79),
$i_1 =$ (Strom im Leiter a—d, Fig. 79).

II. Kapitel.

Wechselstrommessungen.

I. Meßinstrumente.

A. Einteilung.

31. Allgemeines. Hier sei zunächst auf den I. T., 2. B., S. 1 bis 133, verwiesen, wo die Gleich- und Wechselstrominstrumente bereits

besprochen wurden. Im folgenden sollen fast ausschließlich nur Ergänzungen Aufnahme finden. Wie früher (I. T., 2. B., S. 94) schon hervorgehoben wurde, kann man die Meßinstrumente für Wechselstrom sowie alle Meßinstrumente überhaupt (I. T., 2. B., S. 41, § 34) nach den Wirkungen des galvanischen Stromes (I. B., S. 12 und S. 38) einteilen.

Wir haben dort unterschieden:

I. Wirkungen im Stromkreise.

1. Physiologische Wirkungen.
2. Chemische Wirkungen.
3. Wärmewirkungen (Kalorische Wirkungen).
4. Lichtwirkungen.
5. Mechanische Wirkungen.

II. Wirkungen des galvanischen Stromes in die Ferne.

1. Magnetische Wirkungen oder Elektromagnetismus.
2. Elektrische Wirkungen oder Wirkungen der Bewegung des elektrischen Stromes oder Elektrodynamik.

a) Wechselwirkungen zwischen Strömen und zwischen Strömen und Magneten.

b) Induktionswirkungen.

c) Elektrische Schwingungen.

Bezüglich der Benützung der neueren Präzisions-Meßinstrumente mit Zeigerablesung sei hier auf eine kompetente Quelle [1]) verwiesen.

32. Physiologische Wirkungen (I. T., 1. B., S. 24 und I. T., 2. B., S. 35). Die Erschütterungen der Muskeln und Nerven durch den Wechselstrom sind bei den gebräuchlichen Polwechselzahlen viel stärker als durch den Gleichstrom, da diese Wechselzahl eine niedrige ist. In diesem Falle sind bereits 200 Volt lebensgefährlich. Schätzungen von Spannungen durch Anfassen der Leitungen sind nur bei Spannungen bis zu 100 Volt zulässig und sollten gänzlich vermieden werden. Man berührt die beiden Pole gewöhnlich mit dem Daumen und Mittelfinger der rechten Hand und schließt aus der Stärke der physiologischen Wirkung auf die Spannung.

33. Chemische Wirkungen (I. T., 1. B., S. 25 und II. T., 2. B., S. 36). Der Gleichstrom wirkt auf die Elektroden (I. T., 1. B., S. 39)

[1]) W. Marek, Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 447.

in der Weise ein, daß er von der + Elektrode + Teilchen loslöst und diese auf die — Elektrode schafft; umgekehrt überführt er — Teilchen von der — Elektrode auf die +. Der Gleichstrom wirkt demnach immer in demselben Sinne, während der Wechselstrom bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne wirkt, so daß eine Lostrennung der Teilchen nicht Platz greift. Die elektrochemischen Wirkungen sind daher bei Wechselstrom ausgeschlossen.

34. Wärmewirkungen (I. T., 1. B., S. 26 und I. T., 2. B., S. 37). Auf diesen Wirkungen beruhen insbesondere die Hitzdrahtinstrumente und die Kalorimeter. Die Hitzdrahtinstrumente (22) beruhen auf der Ausdehnung eines Drahtes durch die Stromwärme. Die Wirkungen dieser Instrumente sind nach dem Jouleschen Gesetze (I. T., 1. B., S. 44) dem Quadrate der Wärmewirkung proportional. 10 Ampère Gleichstrom z. B. erzeugen ebensoviel Wärme, als 10 Ampère Wechselstrom; auch die Anzahl der Polwechsel ist dabei ohne Einfluß. Instrumente dieses Grundsatzes sind deshalb sowohl für Gleichstrom als auch für Wechselstrom mit derselben Eichung geeignet. Solche Instrumente erweisen sich unabhängig von der Polwechselzahl und von der Kurvenform; sie sind gegen äußere magnetische Einflüsse vollkommen unempfindlich. In den Kalorimetern (29) wird die Stromwärme an eine Flüssigkeit abgegeben. Diese Instrumente sind ungenau, höchst umständlich und daher unpraktisch; sie werden in der Elektrotechnik höchst selten für Gleich- und Wechselstrom verwendet.

35. Lichtwirkungen (I. T., 1. B., S. 27 und I. T., 2. B., S. 38). So wie bei Gleichstrom kann man auch bei Wechselstrom aus der Helligkeit der Glüh- und Bogenlampen und der Länge des Lichtbogens auf die Spannung beziehungsweise Stromstärke schließen.

36. Mechanische Wirkungen (I. T., 1. B., S. 28 und I. T., 2. B., S. 39). Da der elektrische Funke Papier, Glas u. s. w. durchlöchert, kann man aus der Dicke des durchlöcherten Gegenstandes die Spannung abschätzen.

37. Elektromagnetismus (I. T., 1. B., S. 29 und I. T., 2. B., S. 40 bis 42). Galvanometer mit Magnetnadeln sind bei Wechselströmen unbrauchbar, weil das rasch wechselnde magnetische Feld des Stromes auf das beständige Feld der Nadel keine Wirkung ausübt. Die Magnetnadel vermag demnach den raschen Wechseln des magnetischen Feldes nicht zu folgen und gerät bei langsamen Wechseln desselben in eine vibrierende (zitternde) Bewegung, während sie bei sehr raschen Wechseln keine Bewegung ausführt. Weicheiseninstrumente eignen sich auch für Wechselstrom, wenn die Polwechselzahl eine ge-

wisse Grenze nicht überschreitet, so daß der Eisenkern den wechselnden Magnetisierungen zu folgen vermag. Dieser Umstand trifft praktisch immer zu. Diese Instrumente müssen jedoch für Gleich- oder Wechselstrom besonders geeicht werden, da die Anzeigen bei Wechselstrom hinter den Angaben bei Gleichstrom zurückbleiben. Die Ursachen dieser Erscheinung sind:

1. Hysteresis und Wirbelströme. Ändert man die magnetisierende Kraft, so bleiben die Änderungen des Magnetismus hinter den Änderungen der Kraft zurück; diese Eigenschaft paramagnetischer Körper (I. T., 1. B., S. 47) nennt man Hysteresis (Zurückbleiben). Wirbelströme sind Induktionsströme (I. T., 1. B., S. 61). Die Hysteresis und die Wirbelströme in den Eisenbestandteilen der Instrumente nehmen mit der Wechselzahl zu. Die Bestimmung des Hysteresiskoeffizienten folgt später (S. 349). Den Verlauf dieses Koeffizienten im Bleche hat Georg Stern[1]) angegeben.

2. Wirbelströme in den Metallteilen der Instrumente. Diese Ströme haben die entgegengesetzte Richtung als die zu messenden Ströme und schwächen somit deren magnetisches Feld.

Die Angaben der Weicheiseninstrumente sind im Gegensatze zu den Hitzdrahtinstrumenten (I. T., 2. B., § 96) von der Form der periodischen Kurve der elektromotorischen Kraft (I. B., S. 117) und von der Polwechselzahl abhängig.

38. Wechselwirkungen zwischen Strömen (I. T., 2. B., § 43). In diese Gruppe gehören die Elektrodynamometer (I. T., 2. B., § 27). Bei denselben wechseln das feste und bewegliche magnetische Feld gleichzeitig die Richtung, so daß die endgültige Wirkung bei Gleich- und Wechselstrom dieselbe bleibt. Die Ströme durchfließen die beiden Wicklungen hintereinander. Wechselt der Strom seine Richtung, dann wechselt er dieselbe sowohl in den festen als auch in den beweglichen Windungen, so daß die Richtungen immer entgegengesetzt sind und Abstoßung eintritt. Obige Instrumente sind demnach mit derselben Eichung für Gleich- oder Wechselstrom verwendbar.

39. Elektrostatische (I. T., 1. B., § 30) **und elektromagnetische Induktion** (I. T., 2. B., § 44). Auf der elektrostatischen Induktion beruhen die Elektrometer (I. T., 2. B., § 31). Instrumente dieser Art werden vorwiegend für Wechselstrommessungen gebraucht. Der Blitz durchschlägt elektrostatische Spannungszeiger leicht, da sie die kürzeste Erdverbindung herstellen. Elektrostatische Meßinstrumente lassen sich zum Messen von Stromstärken nicht verwenden, weil sie auf den Wirkungen der ruhenden Elektrizität beruhen.

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 432.



Unter den Instrumenten elektromagnetischer Induktion wollen wir solche Instrumente verstehen, welche Anziehung und Abstoßung zwischen einer festen, stromdurchflossenen Spule und einem beweglichen Leiter ausüben. Der letztere Leiter ist weder mit der Spule, noch mit deren Stromkreis in Verbindung. Diese Instrumente messen nur Wechselströme, weil sie nur unter den im I. T., 1. B., § 61, angegebenen Ursachen Wirkungen ausüben.

Versuche dieser Art wurden durch Elihu Thomson (1887), Fleming, Uppenborn, W. Peukert, Borgmann, Nipkow, Moser, G. T. Walker, M. v. Dolivo-Dobrowolsky (Phasometer), Teichmüller, Benischke und anderen ausgeführt.

40. Elektrische Schwingungen (I. T., 2. B., § 45) werden insbesondere zum Nachweise der Form der Wechselstromkurven benützt.

B. Messungen.

41. Anforderungen an Wechselstrom-Meßinstrumente. Berechtigte Anforderungen, welche an Wechselstrominstrumente gestellt werden können, sind: Unmittelbare Ablesbarkeit, Ausschläge proportional der Leistung, vollkommene Dämpfung, geringer Energieverbrauch, Unabhängigkeit von der Periodenzahl, von der Kurvenform des Wechselstromes und von der Temperatur, keine Beeinflussung durch Wirbelströme.

42. Messung der Stromstärken. Diese Messungen können wie bei Gleichstrom entweder unmittelbar durch Strommessungen oder mittelbar durch Spannungsmessungen an einem bekannten Widerstande vorgenommen werden.

1. Mittelbare Messung der Stromstärke. Man unterscheidet vorwiegend zwei Methoden:

a) Die Instrumente werden mit Gleichstrom geeicht (eisenfreie Instrumente).

b) Die Eichung der Instrumente erfolgt mit Hülfe jener der Gruppe *a*) (eisenhaltige Instrumente).

Die Wechselstrominstrumente haben einen geringeren Meßbereich und sind unempfindlicher als die Gleichstrominstrumente.

Für schwache Ströme finden Verwendung: Das gewöhnliche Hörtelephon, das optische Telephon, die Hitzdrahtinstrumente, die Elektrodynamometer nach Friedrich Kohlrausch, O. Frölich und Friese mit Spiegelablesung, die Stromwage nach W. Thomson u. s. w. Bei der sogenannten Komposite Balance-Stromwage wird immer nur eine Hälfte benützt. Die linke Hälfte kann als Wattzeiger, die rechte Hälfte als Stromzeiger für schwache Ströme (0 bis 1 Ampère) oder auch als Spannungszeiger mit einem bifilaren (I. T., 1. B., S. 20) Vorschaltwiderstande verwendet werden. Für starke Ströme dienen Elektro-

dynamometer (I. T., 2. B., § 27) und Stromwagen (I. T., 2. B., § 28). Bei den Hitzdrahtinstrumenten (I. T., 2. B., § 37 u. 96) wird nur ein schwacher Draht den Stromänderungen folgen. Bei höheren Stromstärken darf man demnach durch das Instrument nur einen Nebenschluß führen. Man wählt dann einen unveränderlichen Widerstand aus gewelltem Bleche mit kleinstem Temperaturkoeffizienten und legt den Hitzdraht zu diesem Nebenschlusse parallel. Durch den Hitzdraht fließt jetzt bloß ein Zweigstrom und das Instrument mißt die Spannung an den Anschließungspunkten an dem Widerstand aus gewelltem Bleche. Da die Spannung $E = J\ W$ (I. T., 1. B., S. 24), so hängen die Angaben des Instrumentes nur von den Stromstärken ab.

2. Mittelbare Strommessung durch eine Spannungsmessung an einem bekannten Widerstande (I. T., 2. B., S. 31, Fig. 142). Diese Methode wurde bereits bei der Stromstärkemessung mit dem Hitzdraht-Stromzeiger besprochen. Die Stromstärke, welche durch das Galvanometer fließt, darf bei Hitzdrahtinstrumenten nicht vernachlässigt werden.

Die Kompensationsmethoden (I. T., 2. B., S. 74) werden bisher bei Wechselstrommessungen nicht verwendet.

43. Messung der Spannungsdifferenzen. Hitzdrahtinstrumente haben keine Selbstinduktion (I. T., 1. B., S. 62) und können mit Gleichstrom geeicht werden. Bei Instrumenten mit Selbstinduktion dagegen kann die Eichung nur mit Wechselstrom erfolgen. Die Hitzdraht-Spannungszeiger verbrauchen Strom, die elektrostatischen Spannungszeiger fast keinen. Zu technischen Messungen dienen: Quadrant-Elektrometer (I. T., 2. B., § 31), Elektrometer nach Carpentier, elektrostatische Spannungszeiger nach Braun und andere. Den Hitzdrahtinstrumenten werden bifilare Widerstände (I. T., 1. B., S. 20) vorgeschaltet. Die Messung hochgespannter Ströme erfolgt entweder ohne oder mit einem Transformator (I. T., 1. B., S. 78). Der Transformator setzt hochgespannten Strom niederer Stromstärke in solchen von niederer Spannung und hoher Stromstärke um. Der Eisenkern des Transformators ist mit dünnem und dickem Draht umwickelt. Schickt man in die dünnen Drähte einen hochgespannten Strom, so geben die dicken Drähte einen niedrig gespannten Strom ab. Einen hochgespannten Strom kann man behufs Messung auch durch eine Reihe gleichgroßer hintereinander geschalteter bifilarer oder abwechselnd unifilarer (I. T., 2. B., S. 5) Widerstände senden, nur an einem solchen Widerstande die Spannung messen und diese Spannung mit der Anzahl der Widerstände multiplizieren. Hiebei verwendet man zumeist elektrostatische Instrumente. Hier sei auch auf S. 24: Bestimmung und Aufzeichnung periodischer Vorgänge (*EMK* u. s. w.) verwiesen.

44. Einschaltung der Meßinstrumente. Fig. 83 zeigt die Einschaltung der Meßinstrumente einer Wechselstrom-Arbeitsübertragungsanlage. Der Spannungszeiger wird immer zwischen diejenigen Punkte angeschlossen, zwischen welchen der Spannungsunterschied zu messen ist. Derselbe liegt also immer im Nebenschlusse. Er besitzt viele Windungen eines dünnen Drahtes, da nur an den Enden eines größeren Widerstandes — bei geringen Stromstärken — eine größere Spannung vorhanden sein kann. Die Stromstärke muß deshalb

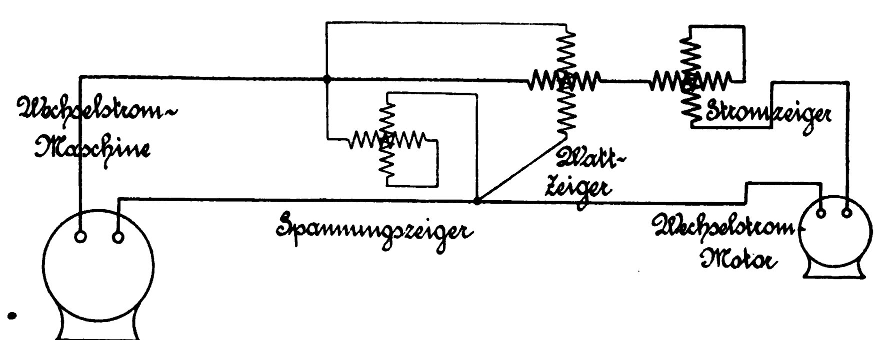


Fig. 83. Einschaltung der Meßinstrumente.

klein sein, weil die Windungen im Nebenschluß zum Hauptstromkreise liegen und demnach bei dauernder Einschaltung des Spannungszeigers zu viel Strom durch den Nebenschluß verbraucht würde. Bei 100 Volt beträgt die Stromstärke des Spannungszeigers etwa 0·03 Ampère, der Wattverbrauch ohne Phasenverschiebung $100 \times 0{\cdot}03 = 3$ Watt und der Gesamtwiderstand nach dem Ohmschen Gesetze

$$W = \frac{E}{J} = \frac{100}{0{\cdot}03} = 3333 \text{ Ohm (I. T., 1. B., S. 22).}$$

Der Stromzeiger liegt mit seinen Windungen im Hauptstromkreise. Will man an irgend einem Punkte einen Stromzeiger behufs Messung der Stromstärke einschalten, so unterbricht man an diesem Punkte die Hauptleitung und schließt dort die Leitung durch den Stromzeiger, so wie sonst durch eine Verbindungsklemme. In diesem Sinne kann man den Stromzeiger als eine Verbindungsklemme ansehen. Der Stromzeiger besitzt wenig Windungen eines dicken Drahtes. Der Widerstand muß gering sein, wenn der Wattverbrauch gering sein soll. Für drei Watt Stromverbrauch müßte bei 100 Ampère nach dem Ohmschen Gesetze der Spannungsverlust $E = \frac{3}{100} = 0{\cdot}03$ Volt sein, also der Widerstand $W = \frac{E}{J} = \frac{0{\cdot}03}{100} = 0{\cdot}0003$ Ohm. Der Wattzeiger besitzt

eine Strom- und eine Spannungsspule und es gilt demnach für denselben das für den Strom- und für den Spannungszeiger Gesagte zugleich. Die Spannungsspule wird demnach so eingeschaltet wie jede Spannungsspule und die Stromspule so wie jede Stromspule auf den gesamten Gebieten der Elektrotechnik. Man kann ganz allgemein sagen: Viele dünne Windungen werden in der Elektrotechnik fast immer in den Nebenschluß, wenige dicke Windungen fast immer in den Hauptstromkreis eingeschaltet.

45. Messung der Leistung und Arbeit. Einphasenstrom. (1. T., 1. B., S. 26 und 110.) Der Wattzeiger mißt die Leistung:

$$P = E\,J \cos\varphi \text{ in Watt (I. T., 1. B., S. 124).}$$

Der Wattstundenzähler mißt die Arbeit:

$$A = E\,J \cos\varphi \,.\, \text{Zeit} = W_f \,.\, \text{Zeit (S. 51).}$$

Setzt man in die letzte Formel für die Zeit Sekunden ein, so erhält man die Arbeit: $A_1 = E\,J \cos\varphi$ Sekunden in Wattsekunden.

Setzt man für die Zeit Minuten ein, so erhält man für die Arbeit:

$$A_2 = E\,J \cos\varphi \text{ Minuten in Wattminuten.}$$

Setzt man für die Zeit Stunden ein, so erhält man für die Arbeit:

$$A_3 = E\,J \cos\varphi \text{ Stunden in Wattstunden.}$$

Den Faktor $\cos\varphi$ in den obigen Formeln nennt man den Cosinus der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung oder den Leistungsfaktor (§ 22).

Bei der Messung geringer Leistungen insbesondere muß man, um genaue Ergebnisse zu erhalten, den Verlust im Wattzeiger $E\,J$ berücksichtigen. Da $J = \frac{E}{W}$ und $E = J\,W$ oder $E = \frac{E}{W}\,W$, erhalten wir durch Multiplikation der 1. und 3. Gleichung: $E J = \frac{E}{W} \cdot \frac{E}{W} \cdot W = \frac{E^2}{W}$. Bezeichnen wir mit w = wirklich vorhandene Watt, mit W = vermittels des Wattzeigers gemessene Watt, so ist $w = W - \frac{E^2}{W}$.

Den Leistungsfaktor kann man nur aus $\cos\varphi = \frac{W_f}{E\,J}$ (S. 51) bestimmen, nicht aber aus $\cos\varphi = \frac{W_f}{\sqrt{W^2 + \omega^2 L^2}}$ (S. 51), wenn sich Eisen in der Spule befindet, außer für geringe Magnetisierungen, etwa bis 3000 Kraftlinien für 1 cm^2, also im geraden Teil der Magnetisierungskurve (I. T., 2. B., S. 243). Hier ist $\frac{B}{\mathfrak{H}} = \mu$ konstant.

46. Messung der Leistung. Zweiphasenstrom. Von den vielen Mehrleitersystemen werden praktisch hauptsächlich die nachfolgenden Systeme verwendet: Verkettetes Zweiphasensystem, Stern- und Dreieckschaltung. Zunächst soll an dieser Stelle das verkettete

Zweiphasensystem, Fig. 84, besprochen werden. Die Ströme in den beiden Spulen haben gegeneinander eine Phasenverschiebung von 90°. Der Strom in der gemeinsamen Rückleitung hat den Wert $i\sqrt{2}$ ($\sqrt{2} = 1{\cdot}4142$ oder rund 1·4), wenn der Strom in einer der beiden anderen Leitungen den Wert i hat.

Beispiel: Wie groß ist der Strom im Leiter *II*, Fig. 85, und die Spannung zwischen den hintereinander geschalteten Spulen, wenn der Strom in *I* = Strom in *III* = 100 Ampère und wenn die Spannung zwischen *I* und *II* = Spannung zwischen *II* und *III* = 220 Volt? Der Strom in *II* = 100 $\sqrt{2}$ Ampère, die Spannung zwischen den hintereinander geschalteten Spulen = 220 $\sqrt{2}$ Volt.

Beispiel: Wie groß ist die Leistung unter den Angaben der Figur 85?

$$P = 2 \,.\, 100 \,.\, 220 = 44.000 \text{ Watt}$$

in den zwei Lampengruppen oder

$$P = \sqrt{2} \,.\, 100 \,.\, 120 \sqrt{2} \text{ Watt}$$

in den Hauptleitungen. Findet zwischen Strom und Spannung Phasenverschiebung statt (sind induktive Widerstände eingeschaltet), so muß man stets noch mit $\cos\varphi$ multiplizieren.

Beweis für die Zusammensetzung der Ströme und Spannungen beim Zweiphasensystem:

a) Versuch. Schaltet man einen Stromzeiger in die gemeinsame Rückleitung, einen zweiten Stromzeiger in eine der beiden anderen Leitungen, so findet man, daß die Stromstärke in der Rückleitung 1·4142mal so groß ist als in einer der beiden anderen Leitungen.

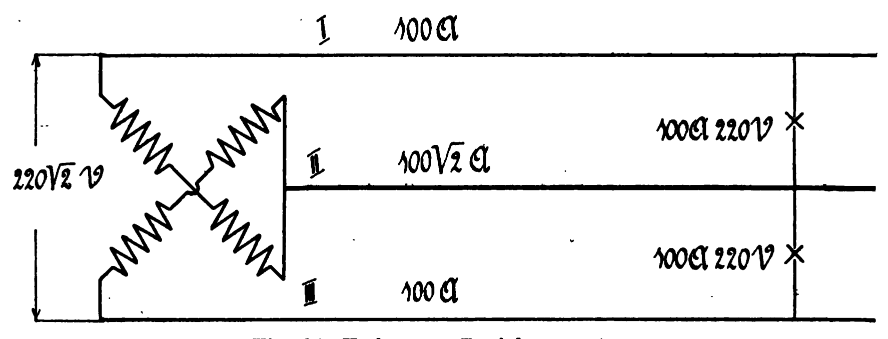


Fig. 84. Verkettetes Zweiphasensystem.

b) Rechnung. Da die beiden Wechselströme 90° Phasendifferenz haben, so ist der eine $i \sin\alpha$, der andere $i \cos\alpha$ und die Summe beider:

$$i \sin\alpha + i \cos\alpha = i \sin\alpha + i \sin(90 + \alpha) = i\,[\sin\alpha + \sin(90 + \alpha)] =$$
$$= 2\, i \sin(\alpha + 45^0) \cos 45^0 = \sqrt{2}\, i \sin(\alpha + 45^0) = 1{\cdot}4142\, i \sin(\alpha + 45^0),$$

d. h.: Der Strom in der gemeinsamen Rückleitung ist 1·4142mal so groß als der Strom in einer der anderen beiden Leitungen und die Phasenverschiebung zwischen dem resultierenden Strome und den einzelnen Strömen beträgt 45°.

c) Graphische Lösung. Setzt man, Fig. 85, nach dem Kräfteparallelogramm sowie bei Kräften die zwei gleichen um 90^0 gegeneinander verschobenen Ströme zu einer Resultierenden zusammen, so ergibt sich das obige Verhältnis sofort aus dem Parallelogramm und man ersieht, daß die Phasenverschiebung zwischen dem resultierenden Strome und den einzelnen Strömen 45^0 beträgt.

In Fig. 85 stellen $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$ zwei um 90^0 gegeneinander in der Phase verschobene Ströme durch ihre größten Werte dar. $\overline{OA_1}$ ist der augenblickliche Wert von $\overline{OA}$, $\overline{OB_1}$ der augenblickliche Wert von $\overline{OB}$. Die augenblicklichen Werte ändern sich von Augenblick zu Augenblick während der Drehung der Vektoren $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$. Die größten Werte (Amplituden) bleiben immer gleich groß, sie sind immer gleich dem größten Werte des Stromes (oder der Spannung u. s. w.) während einer $^1/_2$ Periode und im Vektordiagramm gleich dem Radius. Zeichnet man das Kräfteparallelogramm $OACB$, so stellt die Resultierende den resultierenden Strom $\overline{OC}$ durch seinen größten Wert dar. $\overline{OC_1}$ veranschaulicht dann wieder den augenblicklichen Wert des Stromes, dessen größter Wert $\overline{OC}$ ist (6). Der Phasenunterschied zwischen dem resultierenden größten Strome $\overline{OC}$ und den einzelnen Komponenten $\overline{OA}$ und $\overline{OB}$ beträgt demnach 45^0. Nach dem Pythagoräischen Lehrsatz folgt aus Fig. 85 sofort:

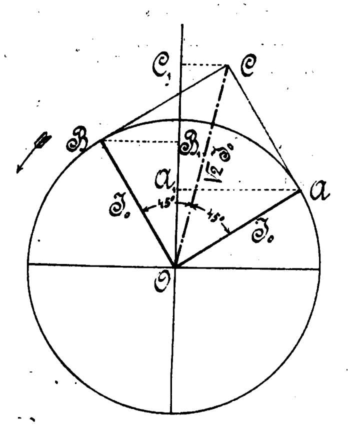


Fig. 85. Zusammensetzung der Ströme.

$$\overline{OC}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 = J_0{}^2 + J_0{}^2 = 2\,J_0{}^2 \text{ und } \overline{OC} = \sqrt{2}\,J_0,$$

was zu beweisen war.

47. Messung der Leistung. Sternschaltung. Bei der Sternschaltung, Fig. 86, sind die drei Wicklungsgruppen des Generators derart miteinander verbunden, daß je ein Ende zu einem gemeinsamen Punkte (neutraler Punkt) führt, während die freien Anfänge mit den Abzweigleitungen in Verbindung stehen. Die Stromverbrauchsgegenstände werden, mit Ausnahme der Motoren, entweder wie bei der Dreieckschaltung zwischen je zwei solche beliebige Leitungen geschaltet oder aber zwischen je eine derselben und eine vom neutralen Punkt abgezweigte Leitung, Fig. 86. Letztere Anordnung wird besonders dann benützt, wenn eine sehr ungleiche Belastung der Gruppen voraussichtlich ist und zum Ausgleich ein neutraler Leiter notwendig erscheint. Gewöhnlich hilft man sich jedoch in der Weise, daß man bei den

Generatoren, Transformatoren und Motoren den neutralen Punkt an Erde legt und der Einfachheit wegen nur drei Leitungen zieht.

Die Sternschaltung besitzt gegenüber dem Zweileitersystem den Vorteil günstigerer Ausnützung des Leitungsmaterials und erleichterten Antriebes der Motoren, welch letztere, aus gleichen Gründen wie früher angegeben, an alle drei Phasen angeschlossen werden.

Bei diesem Systeme sind bei Weglassung des neutralen Leiters die Spannungen zwischen je zwei Leitern größer wie bei der Dreieckschaltung, nachdem sie gleich der Spannung einer Wicklungsgruppe mal $\sqrt{3}$ sind. Die Stromstärken in den Leitungen stimmen dagegen mit denen der Wicklungen überein. Bei der Sternschaltung, Fig. 86, sind die Ströme in den drei Leitungen und die Ströme in den drei Lampengruppen bei gleichmäßiger Belastung des Systems einander gleich. Die Spannung zwischen je zwei Hauptleitungen ist jedoch 1·7321mal so groß als die Spannung einer Lampengruppe.

Hat die Spannung einer Lampengruppe den Wert E, Fig. 86, so ist der Wert der Spannung zwischen je zwei der drei Leitungen gleich $1{\cdot}7321 = \sqrt{3}\,E$.

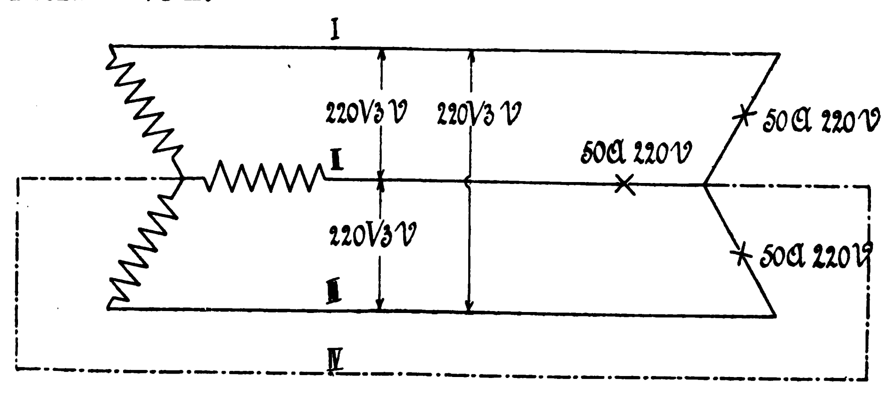


Fig. 86. Sternschaltung mit Knotenpunktleitung.

Beispiel: Die Lampenspannung sei 220 Volt, die Stromstärke einer Lampengruppe 50 Ampère. Wie groß sind 1. die Spannungen zwischen *I* und *II*, *II* und *III* und *I* und *III*, wie groß ist 2. die Spannung zwischen *I* oder *II* oder *III* einerseits und *IV* anderseits, wie groß ist 3. der Strom in den Leitungen *I*, *II*, *III* und *IV* und 4. die Leistung?

Zu 1. Die Spannung zwischen *I* und *II*, *II* und *III* und *I* und *III* ist $220\sqrt{3}$ Volt.

Zu 2. Die Spannung zwischen *I* oder *II* oder *III* einerseits und *IV* anderseits ist 220 Volt.

Zu 3. Der Strom in den Leitungen *I*, *II*, *III* und *IV*. Der Strom in den Leitungen *I*, *II* und *III* beträgt 50 Ampère, der Strom in der Leitung *IV* = Null, wenn die einzelnen Zweige (Lampengruppen) gleichmäßig belastet sind.

Zu 4. Die Leistung in den drei Zweigen:

$$P = 3 \,.\, 50 \,.\, 220 = 33.000 \text{ Watt.}$$

Die Leistung in den Hauptleitungen:

$$P = \sqrt{3} \,.\, 50 \,.\, 220 \,.\, \sqrt{3} = 33.000 \text{ Watt.}$$

Beweis dafür, daß die Spannung zwischen zwei Leitungen gleich ist der Spannung einer Lampengruppe mal $\sqrt{3}$.

a) Versuch. Schaltet man, ähnlich so wie beim Zweiphasenstrom, einen Spannungszeiger an eine Lampengruppe und einen anderen Spannungszeiger zwischen zwei Hauptleitungen, so ersieht man, daß die Ablesung des letzteren Instrumentes 1·7321mal so groß ist als die Ablesung des ersteren.

b) Rechnung. Sei die Spannung der einen Spule $e \sin \alpha$, so ist die Spannung der nächsten Spule $e \sin (\alpha - 120^0)$, daher der Unterschied dieser Spannungen:

$$e \sin \alpha - e \sin (\alpha - 120^0) = \sqrt{3} \,.\, e \sin (\alpha + 30^0),$$

d. h. die Spannungen an den Lampengruppen verhalten sich zu den Spannungen zwischen den Hauptleitungen wie 1 : 1·7321 und die Phasenverschiebung zwischen der resultierenden Spannung und zwischen der Spannung der Gruppen beträgt 30°.

c) Graphische Lösung. Setzt man in einem Diagramm, Fig. 87, nach Art der Kräfte im Kräfteparallelogramm die Spannungen zusammen, so erhält man dasselbe Ergebnis wie unter *b*. In Fig. 87 stellen $O\,A$, $O\,B$ und $O\,C$ die drei größten Werte dreier Ströme vor. Bezüglich der augenblicklichen und größten Werte der Ströme beziehungsweise Spannungen u. s. w. gilt wieder das im § 45 Gesagte. Die augenblicklichen Werte, welche diesem Diagramm entsprechen, sind:

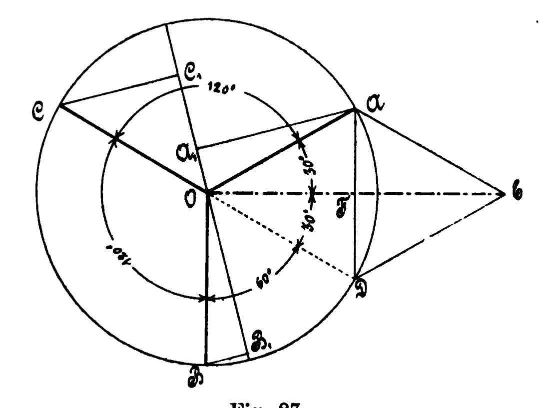


Fig. 87.
Zusammensetzung der Ströme und Spannungen u. s. w.

$\overline{O\,A_1}$ ist der augenblickliche Wert von $\overline{O\,A}$.
$\overline{O\,B_1}$ „ „ „ „ „ $\overline{O\,B}$.
$\overline{O\,C_1}$ „ „ „ „ „ $\overline{O\,C}$.

Wir erhalten den resultierenden Spannungsunterschied zwischen den Spannungsunterschieden $\overline{O\,A}$ und $\overline{O\,B}$, indem wir $\overline{O\,C}$ über den Mittelpunkt O bis zu dem Punkte D verlängern (5 und 7). Der Spannungs-

unterschied $\overline{OA} - C = \overline{OA} + (-\overline{OC})$. $-\overline{OC}$ ist aber $= \overline{OD}$, d. h. man muß $\overline{OC}$ über den Mittelpunkt verlängern und die Resultierende zwischen $\overline{OA}$ und $\overline{OD} = E$ einzeichnen. Die Resultierende E dieses Parallelogrammes stellt den resultierenden Spannungsunterschied dar.

1. Beweis. Die Höhe in einem gleichseitigen Dreieck ist $= \frac{\sqrt{3}}{2}$, d. h. $\overline{OF} = \frac{\overline{OA}\sqrt{3}}{2}$, also $\overline{OE} = 2\,\overline{OF} = \overline{OA}\sqrt{3}$.

2. Beweis. Aus dem Pythagoräischen Lehrsatze folgt:

$$\overline{OF}^2 = \overline{OA}^2 - \overline{AF}^2 = \overline{OA}^2 - \frac{\overline{OA}^2}{4} = \frac{3\,\overline{OA}^2}{4}.$$

Daraus geht hervor: $\overline{OF} = \overline{OA}\,\frac{\sqrt{3}}{2}$ und da $\overline{OE} = 2\,\overline{OF}$, folgt $\overline{OE} = \overline{OA}\sqrt{3}$.

3. Beweis. Nach dem Carnötschen Lehrsatze ist, da $\overline{OA} = \overline{AE}$

$$\overline{OE} = \sqrt{\overline{OA}^2 + \overline{OA}^2 + 2\,\overline{OA}^2 \cos 60^0} \text{ oder}$$

$$\overline{OE} = \sqrt{2\,\overline{OA}^2 + 2\,\overline{OA}^2 \,.\, 0{\cdot}5} = \overline{OA}\sqrt{3}.$$

Dreieckschaltung. Bei der in Fig. 88 angegebenen Dreieckschaltung sind die drei Wicklungsgruppen des Generators hintereinander geschaltet und von den Verbindungsstellen drei gleich starke Leitungen

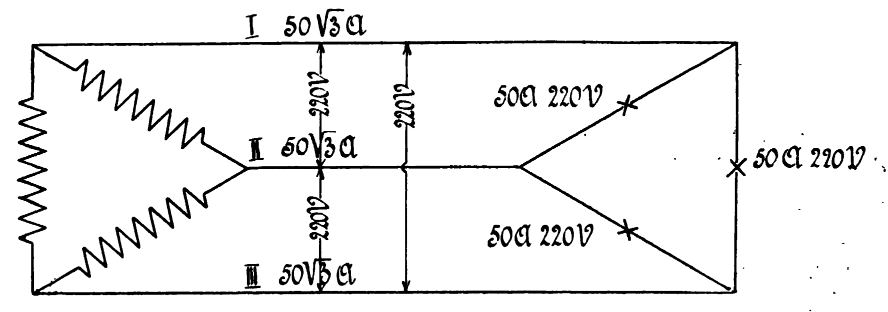


Fig. 88. Dreieckschaltung.

abgezweigt. Mit Ausnahme der Motoren werden die Stromverbrauchsgegenstände zwischen je zwei beliebige Leitungen (jedoch möglichst gleichmäßig) geschaltet, da in allen Gruppen gleiche Spannungen herrschen.

Diese stimmen anderseits mit den Spannungen der zugehörigen Generatorwicklungen überein, während die Stromstärke in einer Leitung gleich Stromstärke einer Gruppe mal $\sqrt{3}$ (= 1·7321 oder rund 1·73) beträgt. Die Motoren werden behufs Erzielung eines Drehfeldes und

günstiger Belastungsverteilung an alle drei Leiter angeschlossen, so daß sie ohne besondere Hülfsmittel auch mit Belastung angehen. Nebst diesem Vorteil ist gegenüber dem Zweileitersystem noch die günstigere Ausnützung des Leitungsmateriales besonders hervorzuheben. Im Betriebe zeigt sich ferner, daß auch bei verschiedener Belastung der Gruppen die Spannungen annähernd gleich sind.

Bei der Dreieckschaltung gilt für die Stromstärken dasselbe, was bei der Sternschaltung für die Spannungen galt.

Die Spannungen zwischen den drei Hauptleitungen und die Spannungen an den Lampengruppen sind einander gleich; der Strom in einer der drei Hauptleitungen ist jedoch 1·7321mal so groß, als der Strom in einer Lampengruppe. Hat der Strom in einer Lampengruppe den Wert i, so ist der Strom in einer der drei Hauptleitungen =

$$= 1{\cdot}7321 = \sqrt{3}\, i.$$

Der Strom

$i = \frac{J}{3}$, wenn $J =$ Gesamtstrom der Stromabnehmer. Der Beweis kann für die Ströme der Dreieckschaltung sowie für die Spannungen der Sternschaltung erbracht werden.

Es ergibt sich demnach für Zwei- und Dreiphasenströme die folgende Regel:

Bei der Sternschaltung ist die verkettete Stromstärke gleich der Phasenstromstärke, bei der Dreieckschaltung ist die verkettete Spannung gleich der Phasenspannung.

Bei der Sternschaltung ist die verkettete Spannung gleich 1·7321 mal der Phasenspannung, bei der Dreieckschaltung ist die verkettete Stromstärke 1·7321 mal der Phasenstromstärke.

Bei der Stern- und Dreieckschaltung vertauschen demnach Strom und Spannung ihre Plätze.

Beispiel zur Dreieckschaltung: Gegeben: Phasenspannung = 220 Volt, Phasenstromstärke 50 Ampère. Zu berechnen: Verkettete Spannung, Verketteter Strom, Leistung.

1. Verkettete Spannung: 220 Volt.

2. Verketteter Strom: 50 $\sqrt{3}$ Ampère.

3. Leistung in den drei Lampengruppen

$$P = 3\,.\,50\,.\,220 = 33.000 \text{ Watt.}$$

Leistung in den Hauptleitungen

$$P = \sqrt{3}\,.\,50\,\sqrt{3}\,.\,220 = 33.000 \text{ Watt.}$$

Befinden sich in den Zweigen induktive Widerstände (Drosselspulen, Transformatoren, Motoren), so muß man obige Werte für P noch mit $\cos\varphi$ multiplizieren, wobei φ = Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung.

48. Messung der Leistung des Dreiphasenstromes durch drei Wattzeiger. Sternschaltung. Bezeichnen wir mit i_1, Fig. 89,

die effektive Stromstärke, welche durch $A\ O$ fließt, mit e_1 den zwischen $A\ O$ herrschenden Spannungsunterschied und mit φ_1 den Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung, so ist die Leistung P_1 des Wechselstromes in dem Zweige $A\ O$ durch die Gleichung

$$P_1 = e_1\, i_1 \cos \varphi_1 \text{ gegeben.}$$

Die Leistung in den drei Zweigen hat demnach den Wert

$$P = e_1\, i_1 \cos \varphi_1 + e_2\, i_2 \cos \varphi_2 + e_3\, i_3 \cos \varphi_3.$$

Diese Leistung kann durch drei Wattzeiger, welche nach dem Schema Fig. 90 eingeschaltet sind, bestimmt werden. In dieser Figur bedeuten A, B und C die Klemmen der Sternschaltung, O den gemeinsamen Verbindungspunkt der Spulenenden. Die drei Wattzeiger sind durch je zwei aufeinander senkrecht stehende Spulen angedeutet. Die dickeren Spulen liegen im Hauptstromkreise (Stromspulen), die dünnen Spulen liegen im Nebenschlusse (Spannungsspulen). V sind die Vorschaltwiderstände zu den Spannungsspulen.

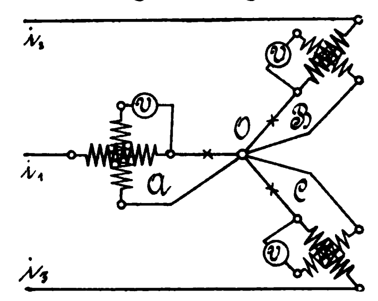


Fig. 89. Messung der Leistung mit drei Wattzeigern.

Nach früherem (Fig. 43) ist $\frac{\omega L}{W} = tg\, \varphi$. Diese Gleichung stellt ein rechtwinkliges Dreieck vor, worin φ ein spitzer Winkel ist, da dieser Winkel im rechtwinkligen Dreiecke immer kleiner als 90° sein muß, sind auch die Winkel φ_1, φ_2 und φ_3 kleiner als 90°. Falls die drei Instrumente dieselbe Konstante besitzen, so addieren sich ihre Ablesungen und die Summe derselben multipliziert mit der gemeinsamen Konstanten gibt die gesamte Leistung des Systems. Siemens & Halske A.-G. lassen bei ihrem Drehstromzähler die beweglichen Spulen des Wattzeigers auf dieselbe drehbare Achse einwirken, so daß ein Zeiger zur Ablesung der Leistung genügt. Sind die drei Zweige gleichwertig, d. h. herrscht in ihnen völlig gleicher Widerstand und gleiche Selbstinduktion und ist e der effektive Spannungsunterschied zwischen O und einer der drei Klemmen A, B oder C und i in einer der Gruppen $O\ A$ oder $O\ B$ oder $O\ C$ so ergibt sich die Leistung

$$P = 3\, e\, i \cos \varphi.$$

Bezeichnen wir mit e' den Spannungsunterschied zwischen zwei Klemmen, so ist

$$e = \frac{e'}{\sqrt{3}} \text{ und } P = 3\, \frac{e'}{\sqrt{3}}\, i \cos \varphi = \sqrt{3}\, e'\, i \cos \varphi.$$

49. Messung der Leistung des Dreiphasenstromes durch zwei Wattzeiger. Sternschaltung. Wir wollen die Leistung des Wechselstromes in einem Augenblicke bestimmen. Der Punkt O, Fig. 89, sei mit der Erde leitend verbunden, so daß sein Potential den Wert Null hat. A, B und C seien die augenblicklich herrschenden Spannungsunterschiede zwischen diesen Punkten und zwischen O. J_1, J_2 und J_3 seien die augenblicklich in den Zweigen OA, OB und OC fließenden Ströme. $\mathfrak{A}$ bedeute die Arbeit, die von den obigen Strömen in der Sekunde geleistet werden würde, wenn von dem betrachteten Augenblicke an diese Größen konstant würden.

Dann ist die Arbeit in der Zeit dt

$$\mathfrak{A}\,dt = (A - O)\,J_1\,dt + (B - O)\,J_2\,dt + (C - O)\,J_3\,dt \text{ oder}$$
$$\mathfrak{A} = A\,J_1 + B\,J_2 + C\,J_3.$$

Bilden wir daraus den Mittelwert, so erhalten wir die Leistung der drei Zweige die man nach früherem mit drei Wattzeigern messen kann. Da aber $J_1 + J_2 + J_3 = O$ (I. T., 2. B.) oder $J_3 = -J_1 - J_2$, so ist

$$\mathfrak{A} = A\,J_1 + B\,J_2 - C\,J_1 - C\,J_2 \text{ oder}$$
$$\mathfrak{A} = J_1\,(A - C) + J_2\,(B - C).$$

Der Mittelwert aus diesem Ausdrucke stellt die Leistung in den drei Zweigen vor und kann demnach mit zwei Wattzeigern gemessen werden. $A - C$ ist der Spannungsunterschied zwischen den Klemmen A und C und $B - C$ der Spannungsunterschied zwischen den Klemmen B und C. Es ergibt sich demnach das in Fig. 90 dargestellte Schaltungsschema. Der erste Wattzeiger muß mit der Hauptstromspule im Strome J_1, mit seiner Nebenschlußspule an den Klemmen A und C liegen. Der zweite Wattzeiger muß mit der Hauptstromspule im Strome J_2 und mit seiner Nebenschlußspule an den Klemmen B und C liegen.

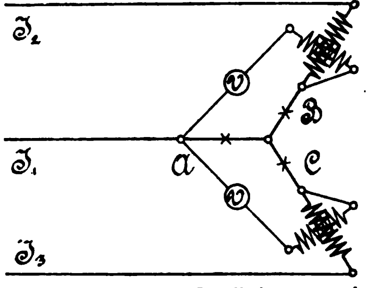


Fig. 90. Messung der Leistung mit zwei Wattzeigern.

Der Mittelwert des Ausdruckes $J_1\,(A - C)$ wird bekanntlich durch einen Ausdruck von der Form $e\,i\,cos\,\varphi$ dargestellt, worin $e =$ effektiver Wert des Spannungsunterschiedes zwischen A und C also gleich $A - C$, $i =$ effektiver Wert der Stromstärke J_1. Ähnlich wird der Mittelwert des Ausdruckes $J_2\,(B - C)$ durch einen Ausdruck von der Form $e\,i\,cos\,\varphi$ wiedergegeben, worin $e =$ effektiver Wert des Spannungsunterschiedes zwischen B und C also der Spannungsunterschied $B - C$ ist, $i =$ effektiver Wert der Stromstärke J_2. Wir können nun zwei Fälle unterscheiden:

1. Die Zweige $A\ O$, $B\ O$ und $C\ O$ seien induktionsfrei. Dann ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen e und i gleich dem Phasenverschiebungswinkel zwischen der Spannung $A\ O$ und der Spannung $A - C$. Dieser Phasenverschiebungswinkel beträgt nach Fig. 87 30°, daher ist $\cos \varphi = \frac{1}{2}\sqrt{3}$. Für die Leistung erhalten wir demnach die Formel:

$$P = \frac{1}{2}\sqrt{3}\ (e_1\, i_1 + e_2\, i_2).$$

Setzen wir gleichbelastete Zweige voraus, dann ist $e_1 = e_2 = e$ und $i_1 = i_2 = i$ und daher

$$P = e\, i \sqrt{3}.$$

2. Die Zweige $A\ O$, $B\ O$ und $C\ O$, Fig. 90, enthalten induktive Widerstände (Drosselspule, Transformator, Motor u. s. w.). In diesem Falle ist der Höchstwert von J_1 gegen den Höchstwert der Spannung $A\ O$ um einen Winkel verschoben. Wie oben erklärt wurde, muß dieser Winkel kleiner als 90° sein. Weil die Spannung $A\ O$ gegen die Spannung $A - C$ eine Phasenverschiebung von 30° hat, kann der Winkel φ in der Formel für die Leistung P auch größer werden als 90°. Dann wird P negativ und es werden sich die Angaben der beiden Wattzeiger nicht mehr addieren, sondern subtrahieren. Man muß deshalb die Richtung des Stromes entweder in der Hauptstromspule oder in der Nebenschlußspule umkehren. Um den Hauptstrom nicht zu unterbrechen, wechsle man die Anschlüsse des Nebenschlusses. Man subtrahiert nun die Angabe des Wattzeigers, in welchem der Richtungswechsel vorgenommen werden mußte, von der Angabe des anderen Wattzeigers. Wenn, ähnlich so wie bei der Leistungsbestimmung durch drei Wattzeiger, die beiden Wattzeiger bei der Leistungsmessung durch zwei Wattzeiger gleiche Konstanten besitzen, dann kann man wieder die Leistungen unmittelbar addieren oder subtrahieren. Es ist dann nur erforderlich, die Summe oder den Unterschied der Leistungen mit der Konstanten zu multiplizieren. Ebenso läßt sich, ähnlich dem obigen Falle der Leistungsmessung durch drei Wattzeiger, auch bei der Leistungsmessung durch zwei Wattzeiger ein Wattzeiger bauen, so daß die Nebenschlußspulen auf dieselbe Achse drehend wirken. Dann addieren oder subtrahieren sich die Drehungsmomente und man erhält wieder durch eine Ablesung eines Zeigers die richtige Angabe.

50. Messung der Leistung des Dreiphasenstromes mit einem Wattzeiger. Sternschaltung. Man kann auch mit einem Wattzeiger die Leistung des Dreiphasenstromes bestimmen, wenn man den Strom für kurze Zeit unterbrechen kann. Man benützt dann wesent-

lich das Schema Fig. 90 und schaltet das Instrument einmal zwischen A und B und das anderemal zwischen A und C ein. Zu diesem Zwecke kann ein Umschalter benützt werden. Schlägt der Wattzeiger verkehrt aus, so kann man die Anschlüsse des Nebenschlusses, am besten mit Hülfe eines Stromwenders, vertauschen. Bei einem Instrumente hat man auch nur eine Konstante und verfährt bei der Messung wie oben, d. h. man addiert oder subtrahiert die zweite Ablesung von der ersten und multipliziert das Resultat mit der Konstanten des Wattzeigers.

51. Messung der Leistung des Dreiphasenstromes. Dreieckschaltung. Die Leistung der drei Zweige ist so wie bei der Sternschaltung wieder der Mittelwert aus den Leistungen der augenblicklichen Werte. Die Leistung eines augenblicklichen Wertes ergibt sich mit Bezug auf Fig. 91 aus der Gleichung:

$$P = (A - B)\, i_1 + (B - C)\, i_2 + (C - A)\, i_3.$$

Nach Ausmultiplizieren der Klammern und Ordnen nach A folgt:

$$P = A\,(i_1 - i_3) + B\,(i_2 - i_1) + C\,(i_3 - i_2).$$

Weil aber $i_1 - i_3 = J_1$, $i_2 - i_1 = J_2$ und $i_3 - i_2 = J_3$, daher ist $P = A\,J_1 + B\,J_2 + C\,J_3$ so wie oben (§ 49).

Der Mittelwert aus den Leistungen der augenblicklichen Werte gibt wieder die Leistung. Dieselbe läßt sich also mit drei Wattzeigern, Fig. 91, bestimmen. Damit wieder A, B und C absolute Werte vorstellen, muß man sich den Punkt, in welchem die drei Spannungsspulen zusammenstoßen, mit der Erde leitend verbunden denken. Berücksichtigt man, daß $J_1 + J_2 + J_3 = 0$ oder $J_3 = -J_1 - J_2$ und $P = A J_1 + B J_2 - C J_1 - C J_2$ und $P = J_1\,(A - C) + J_2\,(B - C)$, dann läßt sich auch hier die Leistung mit zwei Wattzeigern bestimmen.

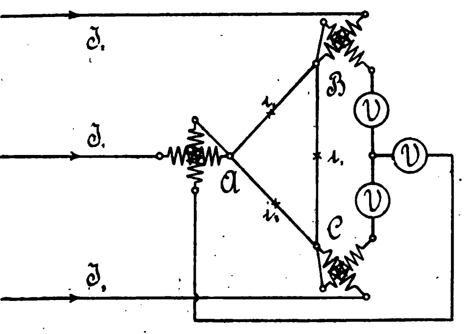


Fig. 91. Messung der Leistung.

Man findet nun auf folgende Weise, ob man die Angaben der beiden Wattzeiger zu addieren oder zu subtrahieren hat. Man schaltet zunächst in die drei Zweige $A\,B$, $B\,C$ und $A\,C$, Fig. 91, induktionsfreie Widerstände. Dadurch bestimmt man die Ausschlagsrichtung der Wattzeiger, weil die Angaben der beiden Wattzeiger bei induktionsfreien Widerständen addiert werden müssen. Jetzt ersetzt man die induktionsfreien Widerstände durch induktive und subtrahiert die Angabe desjenigen Wattzeigers, welcher verkehrt ausschlägt und dessen Neben-

schluß deshalb gewendet werden muß. Der verkehrte Ausschlag des einen Wattzeigers erklärt sich aus der folgenden Überlegung.

Im induktionsfreien Widerstande fällt der Höchstwert der Stromstärke im Zweige *A C*, Fig. 91, mit dem Höchstwerte der Klemmenspannung *A* — *C* zusammen. Der Höchstwert der Stromstärke dagegen in der Zuleitung zu *A* schließt mit der Stromstärke in *A C* einen Winkel von 150°, ∢ *C O E*, Fig. 87, ein. *E O*, Fig. 87, gibt die Richtung der Stromstärke in *A C* an und *A O* die Richtung der Stromstärke in der Zuleitung zu *A*. Ist der Widerstand induktiv, dann bleibt die Stromstärke im Zweige *A C*, Fig. 91, gegen die Klemmenspannung *A* — *C* um einen Winkel φ zurück. Dieser Winkel kann nahezu 90° werden. Der Radiusvektor, welcher die Klemmenspannung zwischen *A* und *C* vorstellt, muß deshalb innerhalb des Winkels *E O C* liegen, also mit *O C* einen Winkel einschließen, welcher kleiner als 90° sein kann. Der Cosinus dieses Winkels erhält demnach jetzt das entgegengesetzte Zeichen, wie beim induktionsfreien Widerstand. Hier sei hingewiesen auf die Arbeiten von Georg Stern über angenäherte Methoden zur Messung der Leistung,[1] Elektrizitätszähler für Dreiphasenstrom mit 4 Leitungen[2] und über Drehstromzähler.[3]

52. Messung der Phasendifferenzen (I. T., 1. B., S. 116). Die Spannung kann man an einem Spannungszeiger, die Stromstärke an einem Stromzeiger ablesen. Den Cosinus der Phasenverschiebung zwischen Stromstärke und Spannung erhält man dann, wenn man die Ablesung am Wattzeiger durch das Produkt der Ablesungen am Spannungs- und Stromzeiger dividiert, d. h.: $\cos\varphi = \frac{E \,.\, J \,.\, \cos\varphi}{E \,.\, J}$. Die Phasendifferenz bestimmen die Phasenzeiger von v. Dolivo-Dobrowolsky[4] und J. Teichmüller.[5] Vorrichtungen dieser Bauart erzeugen ein sich drehendes magnetisches Feld, so wie dasselbe in Drehstrommaschinen (§ 27) entsteht. Diese Instrumente enthalten Eisen. Der Phasenzeiger nach Josef Tuma[6] ist eisenfrei und gestattet auch unmittelbare Ablesungen. Er besitzt ein feststehendes und lotrecht darauf ein bewegliches Spulenkreuz, durch welche die Ströme verschiedener Phase geschickt werden. Hervorgehoben seien noch die Phasenzeiger von Th. Bruger und Martiensen.[7]

---

[1] Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 577.
[2] Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 267.
[3] Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 666.
[4] Elektrotechnische Zeitschrift, 1894, S. 350.
[5] Elektrotechnische Zeitschrift, 1897, S. 569, 581, 616 ff.
[6] Elektrotechnische Zeitschrift, 1898, S. 332, D. R. P. Nr. 95954.
[7] Zeitschrift für Elektrotechnik 1898, S. 108, 117.

Die genaue Messung sehr großer Phasenverschiebungen wird derzeit durch die Meßtechnik nur in unvollkommener Weise gelöst. Der Wattzeiger, als wichtigstes hiefür in Betracht kommendes Instrument, muß als unbrauchbar bezeichnet werden, wenn es sich um einen Leistungsfaktor $\cos \varphi \leqq 0{\cdot}1$ handelt.

Wir lesen dann z. B. bei 0·1 des größten Meßbereiches ab, wo die Teilstriche gewöhnlich dichter und schwerer ablesbar sind und erhalten infolgedessen bereits dann unsichere Resultate, wenn das Instrument zufällig mit Strom und Spannung voll belastet ist. Im Mittel sind die Ablesungen jedoch noch darum viel unsicherer, weil man natürlich zumeist unterhalb der Belastungsgrenze arbeiten wird, d. h. also sich mit weniger als 5% des größten Ausschlages begnügen muß. In solchen Fällen ist man froh, wenn diese Unsicherheiten, zu denen noch die Unbeständigkeit der Nullage hinzutreten kann, zu keinem größeren Fehler als 20% führen.

Im Gegensatze hiezu verlangt die Praxis in wichtigen Fällen gebieterisch eine zuverlässige Wattmessung bei sehr großen Phasenverschiebungen. So zur Messung des Leerlaufes von Induktionsmotoren, wo der Leistungsfaktor zwischen 0·1 und 0·3 schwankt, dann zur Bestimmung der Güte von Eisenblechen, wo Leistungsfaktoren bis zu 0·08 hinab mit Sicherheit zu bestimmen sind. Erhöhte Teilnahme haben gerade diese beiden Fälle mit Bezug auf die jüngsten Verhandlungen des Verbandes deutscher Elektrotechniker gewonnen, einerseits durch den Beschluß, Eisenuntersuchungen nur mittels Wattmessungen vorzunehmen, anderseits durch die Annahme des Entwurfes über Maschinennormalien, in welchen die Messung des Leerlaufes von Motoren zur Bestimmung des Wirkungsgrades mit Recht als besonders bedeutungsvoll hervorgehoben wird.

Im Gegensatze zum Wattmetergrundsatz, welcher auf der Multiplikation der augenblicklichen Werte beruht, gründet sich ein anderes Verfahren,[1]) welches genauere Messungen gestattet, auf die Messung von Summe und Unterschied der augenblicklichen Werte.

53. Frequenzmesser nach Gustav Wilhelm Meyer.[2]) In einer von Wechselstrom durchflossenen Spirale befindet sich ein Eisendraht, welcher durch die Erwärmung Längenänderungen erfährt und auf einen Zeiger überträgt. Die Vorrichtung mißt die Anzahl der Perioden in

---

[1]) Max Breslauer, Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 356.
Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 333.
Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 356.

[2]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1897, S. 47.
Zeitschrift für Elektrotechnik, 1896, S. 520 und 1897, S. 49, 513.

der Sekunde (I. T., 1. B., S. 116). Eine ausführliche Bestimmung der Periodenzahl folgt auf Seite 121.

Hier sei noch auf sechs Methoden zur Messung der Frequenz [1]) verwiesen.

C. Praktische Bauarten.

54. Hitzdraht-Stromzeiger von Hartmann & Braun. 1. Einrichtung. Auf der Grundplatte G_1, Fig. 92 und 93, sitzt das Messinggehäuse M und auf diesem der Messingring R samt dem Glase G_2. Durch die Hartgummiisolationen J und i sind die mit der Grundplatte G_1 verschraubten Anschlußklemmen K_1 und K_2 von der Grundplatte G_1 isoliert. Zwei von den Schrauben, welche die Anschlußklemmen K_1 und K_2 mit der Grundplatte G_1 verbinden, tragen die Platinsilberlocke

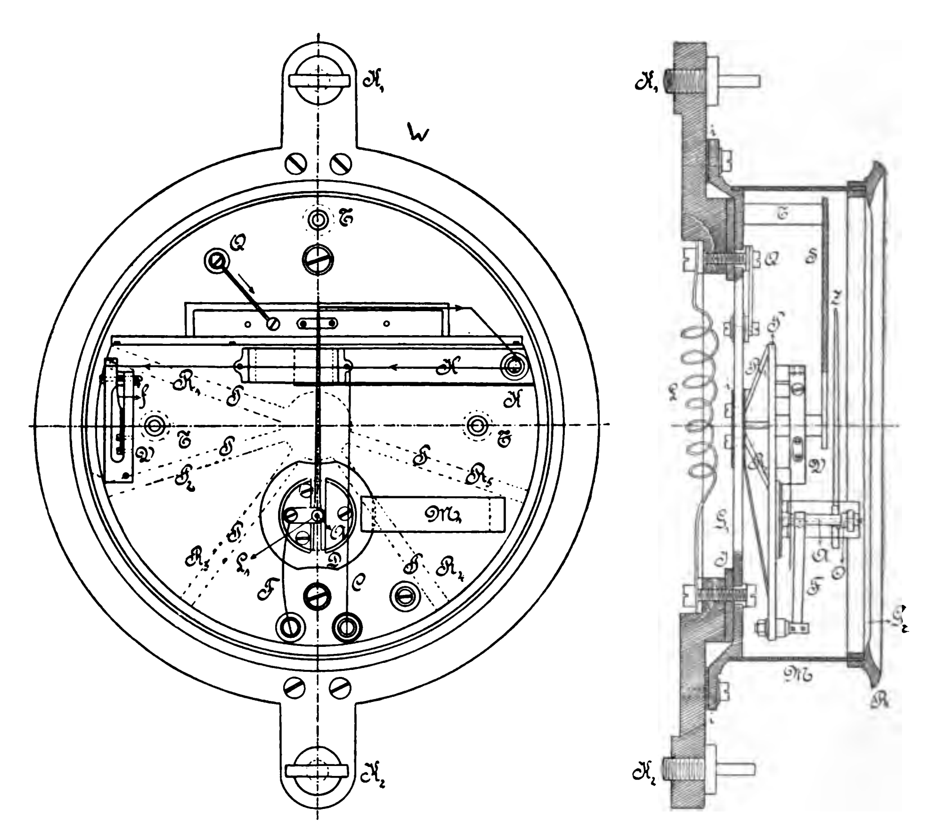


Fig. 92. Hitzdraht-Stromzeiger von Hartmann & Braun. 93.
Statt P_2 lies R_2.

---

[1]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1899, S. 428.

L, durch welche der Hauptstrom fließt. Mit der Grundplatte isoliert verschraubt sind die Rippen R_1 bis R_5 samt der Metallplatte P. Auf der Mittelplatte P sitzt die Spannungsvorrichtung V aus Messing, welche vermittels der Feder f den Hitzdraht spannt. Die Achatlager O (Schnitt) und L_1 (Grundriß) tragen die Achse A des Instrumentes, auf welchem der Aluminiumzeiger Z sitzt. Die drei Ständer T dienen zur Befestigung der Teilung S. Der Kokonfaden C überträgt die Längenveränderung, welche der Hitzdraht H durch die Wärme erfährt, auf die Achse A mit Hülfe einer Rolle, welche in den Figuren 94 und 95 ersichtlich ist, und mit Hülfe der Stahlfeder F. Vom Kokonfaden führt ein Faden über eine Rolle zu der Stahlfeder F. Der Faden ist an den Kokonfaden angeknüpft und mit Schellack verklebt. Zur Erreichung einer aperiodischen Dämpfung (I. T., 2. B., S. 39) befindet sich auf der Achse des Zeigers eine Aluminiumscheibe D. Letztere bewegt sich zwischen den Polen des kräftigen Stahlmagneten M_1. In Fig. 95 ist ein einfacher grundsätzlicher Entwurf eines Hitzdrahtinstrumentes wiedergegeben.

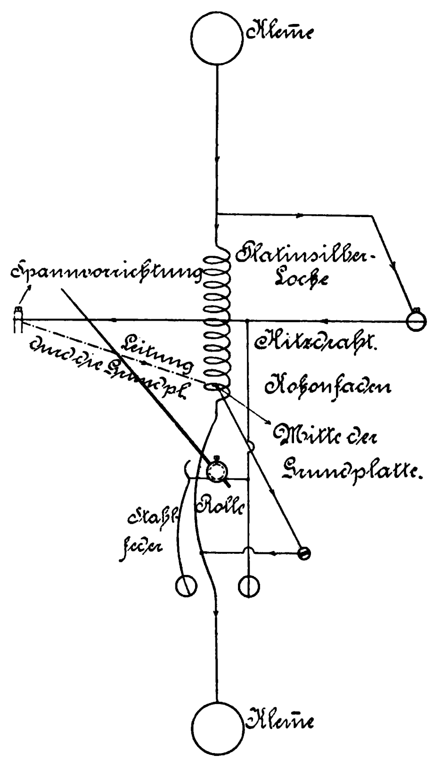


Fig. 94. Stromverlauf im Hitzdraht-Stromzeiger von Hartmann & Braun.

Statt durd lies durch.

2. Tätigkeit. Durch die Wärmewirkung des Stromes dehnt sich der Hitzdraht H aus. Dadurch wird der Kokonfaden C weniger gespannt, die Stahlfeder F zieht an und bewegt die Achse A samt dem Aluminiumzeiger Z. Da der Hitzdraht H bei verschiedenen Temperaturen eine verschiedene Länge hat, wird das Instrument nur bei einer bestimmten Temperatur seine Nullstellung genau einnehmen. Ist der Faden zu lang oder zu kurz, so muß man an der durch eine Öffnung im Gehäuse M leicht zugänglichen Spannvorrichtung V nachstellen. Dieses Nachstellen erfolgt dadurch, daß man die in der Fig. 92 und 93 an der Spannvorrichtung V ersichtliche Schraube anzieht oder nach-

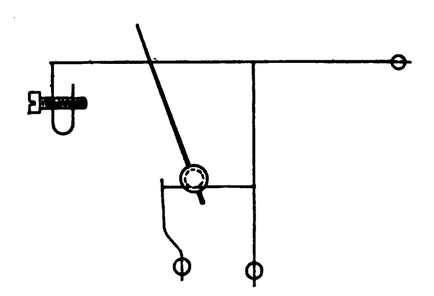


Fig. 95. Einfache Skizze eines Hitzdrahtinstrumentes.

läßt. Auf die Eichung hat die Einstellung keinen Einfluß.

3. Stromverlauf beim Stromzeiger. Der Stromverlauf ist insbesondere in Fig. 94 durch eingezeichnete Pfeile ersichtlich gemacht. Der Hitzdraht *H*, Fig. 92, liegt im Nebenschluß zu der Locke *L*.

4. Unterschied zwischen Strom- und Spannungszeiger. Beim Stromzeiger liegt der Hitzdraht *H*, Fig. 92, im Nebenschlusse zur Locke *L*. Beim Spannungszeiger ist die Locke durch einen Vorschaltwiderstand aus Manganindraht ersetzt. Bei letzterem Instrumente liegt demnach der Hitzdraht im Nebenschlusse zum Vorschaltwiderstande.

5. Stromverbrauch. Der Stromzeiger verbraucht höchstens (beim Endausschlag des Zeigers) 0·2 bis 0·3 Volt. Der Spannungszeiger verbraucht beim größten Ausschlag 0·22 Ampère.

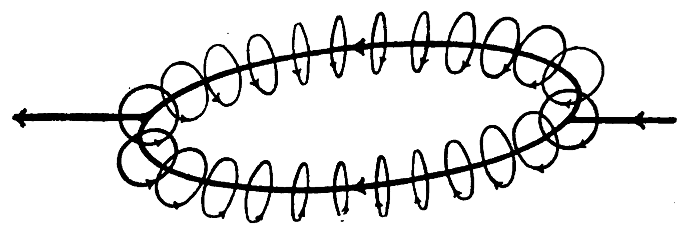


Fig. 96. Kraftlinienverlauf in einem Teilstromträger des Wattzeigers der Siemens & Halske A.-G.

55. Präzisions-Wattzeiger der Siemens & Halske A.-G.[1]) Der Grundgedanke dieses Instrumentes beruht darauf, die bewegliche Spule des Spannungskreises in einem derartigen Feld der Stromspule zu bewegen, daß die Einwirkung derselben unabhängig von der Stellung der Spannungsspule ist, nach Art der Gleichstrom-Meßinstrumente nach dem Grundsatze von Deprez-d'Arsonval. Man denke sich, Fig. 96, einen kreisförmigen Leiter, in welchem sich der Strom, von rechts eintretend, in zwei Teile spaltet und an dem der Eintrittstelle im Durchmesser gegenüberliegenden Teile austritt.

Die Kraftlinien verlaufen dann ringförmig, Fig. 97, und zwar so, daß die an der unteren Seite des Ringes eine radiale Anordnung zeigen.

[1]) Nach einer Druckschrift der Siemens & Halske A.-G.

In diesen radial verlaufenden Kraftlinien schwingt nun die Schwachstromspule und die senkrechten Stromleiter derselben werden in ganz ähnlicher Weise von den Kraftlinien geschnitten, wie dies bei Magnetinstrumenten nach dem Grundsatze von Deprez-d'Arsonval der Fall ist. Um nun die Empfindlichkeit des Instrumentes zu erhöhen, ist die Starkstromleitung nach unten umgebogen und dort der Ring wiederholt.

Es sind demnach zwei solche Ringe, Fig. 96, nebeneinander geschaltet. Die Ringe liegen wagrecht, die Verbindungsstücke, welche die Nebeneinanderschaltung besorgen, senkrecht.

Die Wirkungen werden auf diese Weise addiert. Selbstverständlich kann man die Wirkung der Ströme vervielfachen, wenn man die Windungen in derselben Weise herumführt.

Die senkrecht geführten Teile der Starkstromspule sind übrigens so gelegt, daß sie die bewegliche Spule nicht ungünstig beeinflussen.

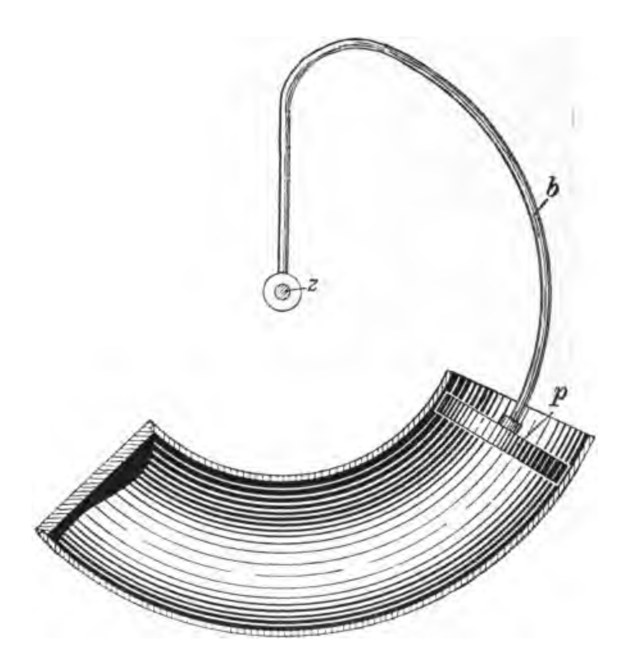


Fig. 97. Luftdämpfung des Wattzeigers der Siemens & Halske A.-G.

Einen wesentlichen Bestandteil des Instrumentes bildet die Luftdämpfung. Dieselbe ist in Fig. 97 dargestellt und besteht aus einem kreisförmig gebogenen Rohre, in welchem sich die Dämpferscheibe *p*, welche mittels eines Armes *b* an der Achse des Instrumentes befestigt ist, bewegt. Die Dämpferscheibe ist an ihrem Rande verbreitert, um der vorbeistreichenden Luft noch einen größeren Reibungswiderstand entgegenzusetzen. Diese Luftdämpfung ist sehr wirksam, weil der Zwischenraum zwischen Dämpferplatte und Rohr, durch welchen die Luft entweichen kann, immer derselbe bleibt und sehr klein gemacht werden kann, ohne daß bei der guten Führung des Kolbens ein Anstoßen desselben zu befürchten wäre. Eine solche Luftdämpfung wirkt

äußerst kräftig und kann selbst Systeme mit größerem Trägheitsmoment und starker Richtkraft aperiodisch einstellen.

Auf diese Weise ist das Instrument gebaut, welches Fig. 98 und 99 zeigen.

Was die nähere Ausführung angeht, so ist folgendes zu bemerken:

I. Feste (Starkstrom-) Spule.

Dieselbe wird aus 2 × 32 Streifen Kupferblech von 0·3 *mm* Dicke und 14 *mm* Breite zusammengesetzt. Bei der kleinsten Type werden sämtliche 64 Streifen hintereinander geschaltet, so daß der Körper 32 Gesamtwindungen erhält. Die einzelnen übereinander liegenden Kupferstreifen werden durch dünne Streifen aus echtem Japanpapier, das in einem besonderen Lack getränkt ist (und in seinem getränkten



Fig. 98. Wattzeiger der Siemens & Halske A.-G.

Zustande eine Dicke von 0·1 *mm* besitzt), voneinander isoliert. Diese Type mit 32 Windungen ist für höchstens 12·5 Ampère bestimmt. Der Körper für höchstens 25 Ampère mit 16 Gesamtwindungen wird erhalten, wenn man je zwei übereinander gelegte Kupferblechstreifen durch Zusammenlöten an ihren Enden parallel schaltet und dann in der üblichen Weise mit zwei anderen parallel geschalteten Streifen ver-

bindet. Für höchstens 50 Ampère werden je vier Streifen zu acht Gesamtwindungen nebeneinander geschaltet, für höchstens 100 Ampère je acht Streifen zu vier Gesamtwindungen, für höchstens 200 Ampère je 16 Streifen in zwei Windungen und für höchstens 400 Ampère sämtliche 2 × 32 Streifen zu einer Windung. Je eine Lage nebeneinander geschalteter Kupferstreifen wird von den über oder unter ihr gelegenen durch einen Streifen getränkten Japanpapiers isoliert.

Außer diesen Kupferkörpern werden auch noch solche für zwei Empfindlichkeiten gebaut, z. B. für Ströme bis höchstens 12·5 und 25 Ampère und auch für höchstens 50 und 100 Ampère. Bei der ersten Type sind die 32 Kupferstreifen in zwei Hälften dergestalt aufgewickelt, daß von oben, in der Richtung der übereinander liegenden Streifen gezählt, Streifen 1 mit Streifen 3 u. s. w. für sich und Streifen 2 mit Streifen 4 u. s. w. wiederum für sich verbunden sind.

Jede Streifengruppe ist von der anderen sorgfältig durch getränktes Japanpapier isoliert. Ähnlich ist der Kupferkörper für 50 beziehungsweise 100 Ampère höchstens gebaut, nur daß hier zwei Gruppen von je vier nebeneinander geschalteten Streifen gebildet sind. Ein Stöpselumschalter gestattet entweder Ende 1 mit Anfang 2 zu verbinden oder Anfang 1 mit Anfang 2 und Ende 1 mit Ende 2. Im letzteren Falle beträgt die Empfindlichkeit des Wattzeigers nur die Hälfte derjenigen, welche die Vorrichtung bei der ersterwähnten Schaltung besitzt. Bei Anfang 1 und Ende 2 schließen die Stromzuführungen an. Die Kupferstreifen, aus denen die Wattzeiger-Starkstromkörper zusammengesetzt sind, werden mit passenden Einschnitten versehen, um ein Zustandekommen von Wirbelströmen im Kupferkörper selbst auf ein Mindestmaß herabzudrücken.

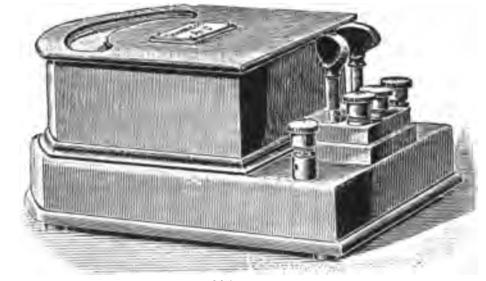


Fig. 99.
Wattzeiger der Siemens & Halske A.-G.

Der in der oben angeführten Weise gewickelte Starkstromkörper für höchstens 12·5 Ampère besitzt bei 17° C. 0·0374 Ω Widerstand, was bei 12·5 Ampère in ihm einen Spannungsverlust von 0·467 Volt verursacht und einen Wattverbrauch von 5·84 Watt. Der Selbstinduktionskoeffizient eines Starkstromkörpers für höchstens 12·5 Ampère beträgt 0·000056 Henry.

II. Bewegliche (Schwachstrom-) Spule.

Diese wird frei auf einen Messingkörper gewickelt, der nach Beendigung der Wicklung aus der Spule herausgezogen wird, die dann aus weiter nichts besteht als dem isolierten Kupferdrahte. In der Wicklung ist ferner oben und unten je eine Elfenbeinbüchse mit entsprechend geformtem Fuße festgelagert, die zur Befestigung der Spule an der Achse dient. Die Wicklung selbst besteht aus mit Seide besponnenem Kupferdraht von 0·1 *mm* Durchmesser in acht Lagen gleich 400 Gesamtwindungen (100 Ohm). Der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule beträgt 0·0088 Henry.

(Bei den Leistungselektrodynamometern der Siemens & Halske A.-G. an deren Stelle der Präzisionswattzeiger treten soll, hat die bewegliche Spule 700 Gesamtwindungen (200 Ohm) mit einem Selbstinduktionskoeffizienten von 0·07 Henry.)

Um die Angaben des Wattzeigers von der Temperatur und den Einflüssen der durch die Selbstinduktion der beweglichen Spule im Spannungskreise hervorgerufenen Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung unabhängig (oder doch so gut wie unabhängig) zu machen und zu ermöglichen, daß für einen beliebigen Wattzeiger ein beliebiger Wattzeiger-Vorschaltwiderstand benützt werden kann, ohne rechnerisch unbequeme Konstanten zu erhalten, wird mit Hülfe eines Vor- und eines Nebenschlusses (beide bifilar aus Manganindraht gewickelt) zur beweglichen Spule der Widerstand zwischen den Spannungsklemmen des Instrumentes auf 1000 Ohm abgeglichen. Ohne besonderen Vorschaltwiderstand ist dann das Instrument für höchstens 30 Volt bestimmt. Durch passende Wahl des Vor- und Nebenschlusses bei der Adjustierung auf 1000 Ohm wird die Konstante des Instrumentes auf eine einfache, rechnerisch bequeme Zahl gebracht, so daß sich die folgenden Bauarten ergeben:

Wattzeiger 12·5 Ampère 30 Volt: größter Ausschlag bei 375 Watt; 1 Teilstrich gleich 2·5 Watt.

Wattzeiger 25 Ampère, 30 Volt: größter Ausschlag bei 750 Watt; 1 Teilstrich gleich 5 Watt.

Wattzeiger 50 Ampère, 30 Volt: größter Ausschlag bei 1500 Watt; 1 Teilstrich gleich 10 Watt u. s. w.

Für je 1000 Ω bifilar gewickelten Manganindrahtes, die man in den Spannungskreis des Wattzeigers einschaltet, kann man dasselbe für Messungen mit einer um 30 Volt höheren Spannung brauchbar machen.

Da bei diesem Instrumente keine Nullmethode benützt wird, vielmehr die Stellung der Spulen sich bei verschiedenen Ausschlägen gegen-

einander ändert, so mußte der Koeffizient der gegenseitigen Induktion untersucht werden. Dies geschah in der Weise, daß der Zeiger des Instrumentes nach und nach auf mechanischem Wege auf 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° gebracht wurde. Hiebei ergaben sich folgende Werte:

Zeiger auf	Koeffizient der gegenseitigen Induktion
0°	0·00016 Henry
30°	0·00010 „
60°	0·00003 „
90°	0·00002 „
120°	0·00009 „
150°	0·00015 „

Mit Hülfe dieser Zahlen läßt sich feststellen, daß bei Arbeiten mit Wechselstrom und Phasenverschiebung die gegenseitige Induktion keinen Einfluß auf die Angaben des Wattzeigers besitzt, ein Ergebnis, zu dem man auch gelangt, wenn man unter Benützung einwandfreier Normalinstrumente die Wattzeigerangaben bei Gleichstrom und bei Wechselstrom mit Phasenverschiebung miteinander vergleicht.

III. Schaltbrettwattzeiger.

Diese Wattzeiger, die ursprünglich nur als Laboratoriuminstrumente mit lotrecht stehender Achse gebaut wurden und von denen Fig. 99 (zwei Meßbereiche) die äußere Ansicht zeigt, werden auch als Schaltbrettinstrumente mit wagrecht liegender Achse und neuerdings auch als registrierende Wattzeiger verfertigt.

IV. Wattzeigerangaben und Wirbelströme.

Ein großer Übelstand bei allen bisher bei Wechselstrommessungen verwendeten Wattzeigern mit größeren Metallmassen bestand darin, daß beim Auftreten von Phasenverschiebungen zwischen Strom und Spannung in den Metallteilen, welche die Wicklung der Vorrichtung schützten und umgaben, ja zum Teil in der Starkstromwicklung der Vorrichtung selbst sich Wirbelströme bildeten, die auf den beweglichen Teil der Vorrichtung gleichfalls eine ablenkende Wirkung ausübten und so die am Instrumente gemachten Ablesungen ganz erheblich beeinflussen konnten.

So hatten Siemens & Halske A.-G. bei dem Wattzeiger als noch Lagerbock, Teilung u. s. w. aus Rotguß beziehungsweise Messing hergestellt und die Kupferstreifen des Starkstromkörpers noch nicht geschlitzt wurden, bei 60° Phasenverschiebung zwischen den Wechselstrom- und Gleichstromangaben des Instrumentes Unterschiede bis zu 10%. Zur Beseitigung derselben wurden bei den vorliegenden Instru-

menten die schon erwähnten Schlitze im Kupferkörper angebracht und ferner im Instrument sämtliche Metallteile mit Ausnahme der unvermeidlichen durch entsprechende Teile aus Vulkanitasbest, der sich durch einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten der Ausdehnung und großen Widerstand gegen Verunstaltung sowie große Festigkeit auszeichnet und durch Holz ersetzt. Durch diese baulichen Anordnungen, die sich in mechanischer Hinsicht vollkommen bewährt haben, wurde der Einfluß der Wirbelströme auf die Angaben des Instrumentes ganz erheblich herabgedrückt, so daß dieselben für die weitaus meisten praktischen Zwecke als vollkommen richtig angesehen werden können.

V. Vorschaltwiderstand.

Zu dem Präzisionswattzeiger gehört ein induktionsfrei gewickelter, in mehrere Stufen geteilter Vorschaltwiderstand. Derselbe ist aus Manganindraht verfertigt, der einen derartig kleinen Temperaturkoeffizienten besitzt, daß die Größe des Widerstandes innerhalb der zulässigen Belastungsgrenzen als unveränderlich betrachtet werden kann. Der Vorschaltwiderstand muß so groß gewählt werden, daß die Stromstärke in dem Spannungskreise des Wattzeigers die vorgeschriebene Grenze (0·03 Ampère) nicht überschreitet. Ohne Vorschaltwiderstand im Spannungskreise darf das Instrument nur benützt werden, wenn die Spannung des Nutzstromkreises nicht mehr als 30 Volt beträgt. Bei Arbeiten mit Wechselstrom wird man ferner bestrebt sein, dem Vorschaltwiderstand einen möglichst großen Wert zu geben, um so den Einfluß der Selbstinduktion der beweglichen Spule auf das Ergebnis der Messung zu beseitigen beziehungsweise möglichst gering zu gestalten. Windungszahl und zulässige Strombelastung der Spannungsspule sind so gewählt, daß einerseits die Selbstinduktion der Spannungsspule nur geringe Korrektionen veranlaßt, die in den seltensten Fällen in der Rechnung berücksichtigt zu werden brauchen, daß anderseits die von den Vorschaltwiderständen aufzunehmende Leistung nicht zu groß wird und so namentlich bei Leistungen von geringerem Strom und hoher Spannung nicht große Berichtigungen einzuführen sind und daß endlich die Vorschaltwiderstände selbst für hohe Spannungen nur einen verhältnismäßig geringen Umfang haben.

56. Präzisions-Spannungs- und Stromzeiger. Die Instrumente sind ähnlich dem Präzisionswattzeiger auf rein dynamometrischem Grundsatz (I. T., 1. B., S. 53, § 58 und I. T., 2. B., S. 36, § 27) erbaut, besitzen also eine feststehende und eine bewegliche Spule und enthalten kein Eisen. Die bewegliche Spule ist wie auch beim Wattzeiger an einer in Spitzen gelagerten Achse befestigt und erhält durch

Federn ihre Stromzuleitung und Richtkraft. Als Dämpfung ist die Luftdämpfung benützt worden, die auch der Präzisionswattzeiger besitzt und die bereits beschrieben wurde.

Beim Bau dieser Instrumente ergaben sich gegenüber dem Präzisionswattzeiger einige wesentliche Unterschiede, die den Bau zum Teil erleichtern, zum Teil aber auch erschweren. Ein erleichternder Umstand ist der, daß man beim Spannungs- und Stromzeiger nicht nötig hat, mit der Ängstlichkeit wie bei den Leistungszeigern alle größeren Metallteile in der Nähe des Feldes zu vermeiden. Bei den Wattzeigern ist jeder, auch der geringste Wirbelstrom in der Nähe der beweglichen Spule störend, weil, wenn eine große Phasenverschiebung zwischen den Strömen in der feststehenden Starkstromspule und der beweglichen Schwachstromspule stattfindet, diese Wirbelströme erhebliche Fehler im Instrument verursachen. Bei den auf elektrodynamometrischem Grundsatz beruhenden Spannungszeigern wird natürlich immer in beiden Spulen Strom von derselben Phase herrschen und bei den Stromzeigern dieser Type wird man bestrebt sein, der Phasendifferenz zwischen den Strömen in der festen und beweglichen Spule den Wert Null oder einen wenig davon verschiedenen zu geben. Alsdann ist der Einfluß der Wirbelströme, die gegen jene die Spulen durchfließenden Ströme stark in der Phase verschoben sind, auf die Angaben der Vorrichtung gering. Man ist also in der Lage, das Instrument ruhig in Metall auszuführen, ohne fürchten zu müssen, irgend welche Fehler hineinzubringen. Es genügt, den Metallrahmen der Wicklung aufzuschneiden, um jeden merklichen Einfluß der Wirbelströme auf die Messung zu vermeiden. Die bauliche Aufgabe wird dadurch sehr erleichtert.

Der zweite sehr wesentliche Unterschied betrifft die Teilung. Bei den Leistungszeigern konnte eine völlig gleichmäßig geteilte Teilung erzielt werden, so daß der Ausschlag der gemessenen Leistung proportional ist. Die Dynamometer messen das Produkt aus den Strömen beider Spulen und bei den Leistungszeigern, wo der eine Strom der Spannung proportional ist, das Produkt aus Strom und Spannung.

Die ablenkende Kraft der festen auf die bewegliche Spule ist unmittelbar diesem Faktor $e \cdot i$ proportional und ferner proportional einer Funktion des Ablenkungswinkels a selbst, verursacht durch die verschiedene Lage, welche die beiden Spulen zueinander entsprechend dem Betrage von $e \cdot i$ haben. Es ist also die ablenkende Kraft

$$D = e \cdot i \cdot f(a).$$

Diese Kraft lenkt die bewegliche Spule ab. Ihr entgegen wirkt die gespannte Feder, also eine Kraft, die proportional dem Winkel a

ist; diese beiden Kräfte müssen einander gleich sein, wenn der Zeiger einspielt. Also:

$$e \,.\, i \,.\, f(a) = c \,.\, a.$$

Um zu erzielen, daß a der Leistung proportional ist, müssen wir die Funktion $f(a)$ zu einer Konstanten machen, d. h. die ablenkende Kraft D muß von der relativen Lage der beweglichen Spule zur festen unabhängig sein. Das ist erreicht durch eine eigentümliche Anordnung des Starkstromfeldes, welche dieses kennzeichnet. Anders steht es bei den Strom- und Spannungszeigern dieser Type. Bei letzteren durchfließt der Strom, den wir messen wollen, sowohl die beweglichen wie auch die festen Spulen.

Bei ersteren kann dies gleichfalls geschehen. Man kann aber auch den zu messenden Strom teilen und einen Teil desselben durch die festen, den anderen durch die beweglichen Spulen senden. In allen diesen Fällen haben wir:

$$D = i^2 f(a) = c\, a.$$

Um Proportionalität zwischen Stromstärke und Ausschlagwinkel zu erzielen, um zu erreichen, daß das Instrument entsprechend der Gleichung:

$$i = p\, a$$

arbeitet, müßte, wie sich aus Vereinigung dieser beiden Gleichungen ergibt, die Vorrichtung so gebaut sein, daß:

$$f(a) = \frac{c}{p^2\, a}.$$

Das ist unmöglich zu erreichen, denn für den Winkel $a = 0$ müßte der Faktor, mit dem die beiden Spulen bei verschiedenem Strom sich beeinflussen, nämlich $f(a)$ ∞ werden, was sich natürlich nicht machen läßt. Man ist daher nicht in der Lage, nach solchem Grundsatz ein Instrument für Spannungs- und Strommessung zu bauen, das eine vollkommen proportionale Teilung hätte wie der Wattzeiger; wir müssen uns begnügen, durch geeignete Anordnung der Spulen die Teilung so brauchbar wie möglich zu machen.

Das ist nicht ganz leicht, weil man für die kleinen Spannungen beziehungsweise Stromstärken stets geringe Ausschläge erhält. Immerhin ist erreicht, daß die Teilungen dieser Strom- und Spannungszeiger wesentlich und zu ihren Gunsten von der quadratischen abweichen und schon von $^1/_4$ bis $^1/_5$ der größten Stromstärke recht gute Ablesungen zulassen.

Im übrigen ist die Funktion $f(a)$ nur von den geometrischen Abmessungen der Spulen abhängig, und da man es in der Hand hat, diese ziemlich genau herzustellen, so fallen die Teilungen bei einem Instrumente wie bei dem anderen aus; man kann sie in der einmal

festgestellten Form durch Druck vervielfältigen lassen, ohne dadurch Abweichungen in den Angaben der verschiedenen Vorrichtungen befürchten zu müssen.

Noch zwei Punkte sind beim Bau derartiger Strom- und Spannungszeiger besonders zu berücksichtigen: Ihre Angaben sollen von der Temperatur ihrer Umgebung und der Dauer der Einschaltung, ferner bei Arbeiten mit Wechselstrom von dessen Periodenzahl oder mit anderen Worten von ihrer Selbstinduktion unabhängig sein. Daß ersteres bei den Spannungszeigern der Fall ist, geht daraus hervor, daß z. B. die Vorrichtungen dieser Gattung, welche die Meßbereiche 0 bis 75 Volt und 0 bis 150 Volt besitzen, für die 75 Volt-Empfindlichkeit einen Widerstand von 750 bis 800 Ohm haben, von denen etwa 75 Ohm aus Kupferdraht gefertigt sind, während der Rest aus Manganindraht besteht. Der Temperaturkoeffizient des für höchstens 75 Volt gewickelten Spannungszeigers beträgt also knapp den zehnten Teil des Temperaturkoëffizienten des Kupfers, kann also für praktische Zwecke unberücksichtigt bleiben.

Der Selbstinduktionskoeffizient eines Spannungszeigers dieser Gattung ist nicht konstant; denn er setzt sich zusammen aus den Selbstinduktionskoeffizienten der festen und der beweglichen Spule und dem doppelten gegenseitigen Induktionskoeffizienten der beiden Spulen aufeinander. Wenn die Spulen lotrecht aufeinander stehen, ist der Koeffizient der gegenseitigen Induktion gleich Null; in der Nullage ist er negativ, beim Endausschlag positiv.

Bei dem vorstehend angeführten Instrument stellt sich die Sache so, daß der Selbstinduktionskoeffizient des ganzen Systems von dem einen bis zum anderen Ende der Teilung zwischen 0·038 und 0·054 Henry schwankt: Bei dem Widerstand des Instrumentes von 800 Ohm will das bedeuten, daß selbst bei 100 Perioden in der Sekunde die Abweichung des scheinbaren vom Ohmschen Widerstande noch weniger als $^1/_{10}$ % beträgt, daß also auch bei Wechselstrom selbst von 100 Perioden der Spannungszeiger noch absolut zuverlässige Angaben liefert, die keiner Berichtigung bedürfen.

Der Spannungszeiger wird mit zwei Meßbereichen gefertigt. Durch Ziehen oder Stecken eines Stöpsels wird der Übergang von einem Meßbereich zum anderen bewerkstelligt. Derartige Vorrichtungen werden gebaut für die Höchstspannungen von:

15	Volt	und	30	Volt
30	„	„	75	„
75	„	„	150	„
150	„	„	300	„
300	„	„	750	„

Zum Messen von Spannungen über 150 Volt bedient man sich eines dieser Spannungszeiger in Verbindung mit einem passend gewählten, besonderen Vorschaltwiderstande. Die Isolation der Metallteile ist überall in solcher Weise durchgeführt, daß sie auch für Spannungen von mehreren 1000 Volt vollständig ausreicht.

Erheblich schwieriger als der Bau des Spannungszeigers gestaltet sich derjenige des Stromzeigers für Gleich- und Wechselstrom.

Denn hier kann man nicht, wie bei jenem, beide Spulen hintereinander schalten, weil die dünnen Federn, die den Strom der beweglichen Spule zuführen, selbstredend nicht mit 50 und mehr Ampère belastet werden können. Man kann durch sie nur einen Teil des zu messenden Stromes schicken und deshalb legt man hier feste und bewegliche Spule in Parallelschaltung. Ohneweiters läßt sich dies aber nicht bewerkstelligen, da sonst die Angaben des Stromzeigers von der Temperatur und bei Wechselstrom auch noch von der Selbstinduktion seiner Spulen stark abhängig werden würden. Wenn die beiden Spulenkreise aus Kupfer ohne Vorschaltwiderstände wären, so würden schon bei geringen Temperaturänderungen falsche Stromverzweigungen eintreten und falsche Ergebnisse hervorgebracht. Ebenso könnten durch ihre Selbstinduktion zwischen den die bewegliche und die feste Spule durchfließenden Strömen verschiedene Phasenverschiebungen eintreten und dadurch unangenehme Störungen sich geltend machen. Dagegen gibt es wieder das Mittel, daß man in jeden der beiden Stromkreise so viel induktionsfreies Widerstandsmaterial ohne Temperaturkoeffizienten einschaltet, daß demgegenüber die Änderung des Kupferwiderstandes mit der Temperatur und die Selbstinduktion der Spulen nicht mehr in Frage kommen. Das würde indessen einen sehr hohen Leistungsverbrauch des Instrumentes bedingen. Man braucht aber nicht bis zu dieser Grenze zu gehen, weil ja immer nur die Widerstandsunterschiede der beiden Stromkreise in Frage kommen. Hätte die Starkstrom- und die Schwachstromspule genau dieselbe Temperatur, so wäre nur erforderlich, ihnen genau denselben Temperaturkoeffizienten zu geben — und es wäre nicht nötig, daß der Temperaturkoeffizient in jedem Kreise Null ist — und da sich beide stets nur um einen gewissen geringen Temperaturunterschied unterscheiden werden, so braucht man nur die Temperaturkoeffizienten einigermaßen gleich zu halten und einigermaßen herabzudrücken, es ist aber nicht nötig, sie wie beim Spannungszeiger gleich auf $^1/_{10}$ desjenigen des Kupfers zu bringen. Hier sind sie auf etwa den vierten Teil des Temperaturkoeffizienten des Kupfers gebracht worden. Das hat sich bei den Versuchen als so ausreichend erwiesen, daß man einen Unterschied zwischen Ablesungen,

die unmittelbar nach mehrstündiger Einschaltung mit Höchstbelastung gewonnen worden waren und solchen, die man vor dem Einschalten gemacht hatte, nicht mehr feststellen konnte.

Das Verhältnis der Selbstinduktion zu den Widerständen der einzelnen Stromkreise ist ebenfalls so günstig, daß zwischen Gleichstrom und Wechselstrom von 100 Perioden die Abweichungen $^1/_{10}\,^0/_0$ nicht übersteigen. Die Stromzeiger werden ebenfalls mit zwei Meßbereichen ausgestattet. Zu diesem Zwecke bringt man im Starkstromkreise noch einen zweiten Vorschaltwiderstand an. Je nachdem man nun den beweglichen Spulenkreis von den festen Spulen und einem Vorschaltwiderstand oder von den festen Spulen und zwei Vorschaltwiderständen abzweigt, die bewegliche Spule also mit geringerer oder mit höherer Spannung belastet, kann man beispielsweise den Endausschlag bei 50 oder 25 Ampère erhalten. Die Verhältnisse sind so gewählt, daß das oben Gesagte hinsichtlich des Temperaturkoeffizienten und des Einflusses der Selbstinduktion bei beiden Schaltungen mit genügender Genauigkeit gilt. Die Vorschaltwiderstände nehmen verhältnismäßig viel Raum ein, hauptsächlich des doppelten Meßbereiches wegen. Daher sieht der Stromzeiger nicht so gefällig aus wie der Spannungszeiger.

Auch ist der Wattverbrauch des Instrumentes natürlich immer noch kein ganz geringer; beim Höchstausschlag bedarf es etwa 40 Watt. Das ist für ein Schaltbrettinstrument etwas viel; aber für ein Laboratoriuminstrument, das ja lediglich für Kontrollmessungen verwendet werden soll, kann man es sich gefallen lassen.

57. Bláthy-Zähler. Die Firmen Ganz & Comp. und Helios bauen diesen Zähler, Fig. 100 und 101, seit dem Jahre 1889. Er besteht zunächst aus einer um eine lotrechte Welle *E E*, Fig. 100, sehr leicht drehbaren Aluminiumscheibe. Letztere dreht sich zwischen den Magneten *M* und *P*. Die Welle *E E* setzt ein Zählwerk *Z* durch einen Schneckentrieb und Übersetzungsräder in Bewegung. Die Aluminiumscheibe ist der induzierenden Wirkung zweier Systeme von Elektromagneten ausgesetzt. Das eine dieser Systeme *P* wird durch den zu messenden Wechselstrom magnetisiert und die Anzahl der erzeugten Kraftlinien ist demnach dem Hauptstrom proportional. Das zweite System *N* wird durch einen Nebenschluß von den Klemmen des Hauptstromes, oder bei hochgespannten Strömen von den sekundären Klemmen eines Reduktors, erregt und wirkt demnach der Spannung proportional. Der Reduktor ist ein Transformator, an dessen sekundären Klemmen in diesem Falle die Niederspannungswicklung (dicke Windungen) des Transformators liegt. Beide Magnetsysteme erzeugen in der Scheibe induzierte Ströme und wirken auf dieselbe so bewegend ein, daß sich

dieselbe dreht. Infolge der Bewegung der Scheibe durch die magnetischen Felder werden aber wieder Ströme induziert, welche der Bewegung der Scheibe entgegenstreben, so daß bei einer gewissen Geschwindigkeit zwischen treibenden und hemmenden Kräften Gleichgewicht eintritt. Diese Geschwindigkeit ist dem Betrage an Leistung proportional, welcher die Leitung als Strombahn dient. Das Hinzufügen eines Stahlmagneten *M* genügt, um geringe Veränderungen der Polwechselzahlen, also z. B. Änderungen der Umdrehungen der Maschine unschädlich zu machen und die Proportionalität selbst bei kleinen treibenden Kräften herzustellen und zu vergrößern. Man fügt deshalb den Hufeisenmagnet hinzu, dessen Pole die Aluminiumscheibe von beiden

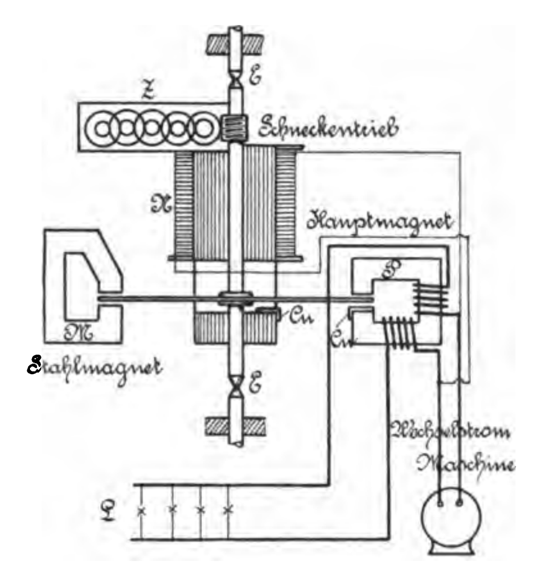


Fig. 100. Schaltung des Bláthy-Zählers.

Seiten umfassen. Dieser Magnet klemmt gleichsam die Scheibe magnetisch (magnetische Bremse) und erschwert ihre Drehung. Dadurch kommt die Scheibe nach dem Ausschalten des Stromes rascher zur Ruhe, so daß fast gar keine Weiterbewegung infolge der Trägheit stattfindet. Fig. 101 veranschaulicht eine Zeichnung dieses Zählers, welche nach einem Originalzähler aufgenommen wurde. Der Hauptmagnet ist vorn unter dem Zifferblatt angebracht. Er besteht aus dünnen Eisenblechen, hat Hufeisenform und ist mit einigen Windungen aus Kupfer umgeben. Die Enden dieser Windungen führen zu vier Klemmen, an welche der Hauptstrom angeschlossen ist. Oben zeigt dieselbe Figur den Nebenschlußmagnet. Er trägt zwei Spulen mit großer Selbstinduk-

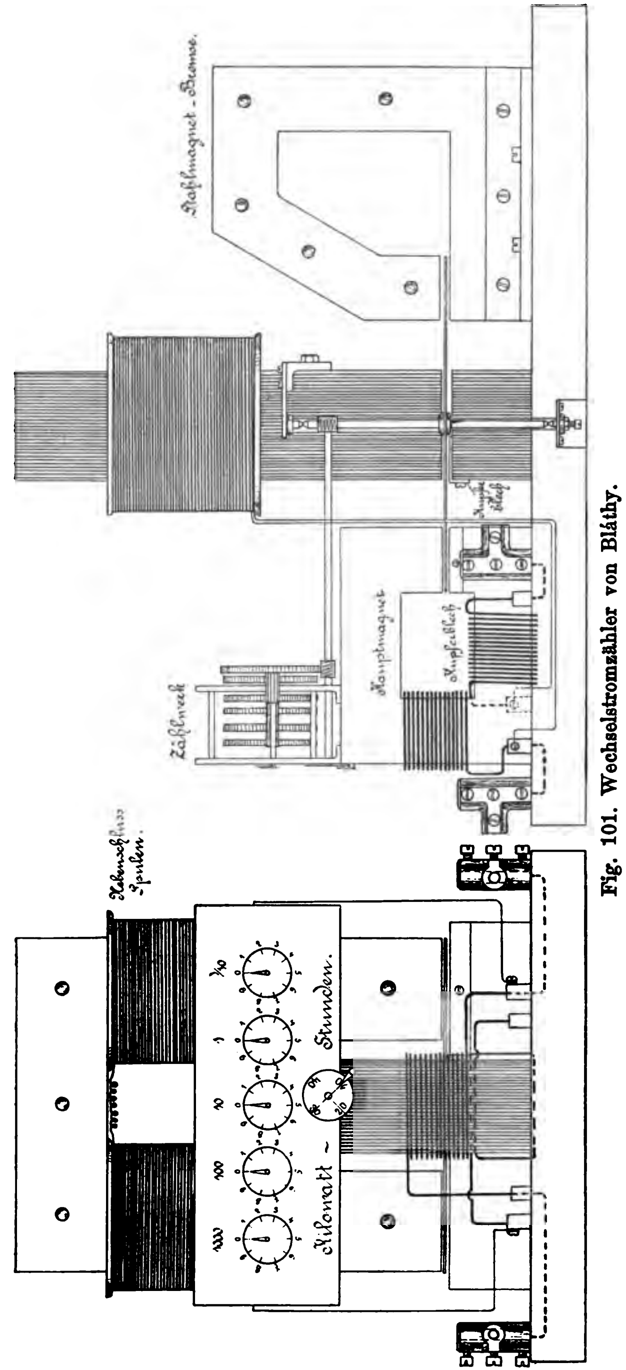


Fig. 101. Wechselstromzähler von Bláthy.

tion, die hintereinander geschaltet und mit den freien Enden an die Hauptleitung angeschlossen sind. Unter diesem Elektromagnete befindet sich ein weiteres Eisenstück, das den magnetischen Stromkreis schließt und dadurch ein homogenes Kraftlinienfeld bewirkt. Das obere Ende der Scheibenwelle trägt eine Schnecke, Fig. 100, die in ein Schneckenrad des Zählwerkes Z eingreift und ihre Bewegung auf das Zifferblatt überträgt. Unter den Polen des Nebenschlußmagneten N befindet sich ein kupferner Schirm $C\,U$ der sich etwas hin- und herbewegen läßt. Dadurch kann das Nebenschlußfeld beeinflußt und eine Nullstellung bei stromlosen Hauptspulen erzielt werden, was sonst bei nicht vollkommen symmetrischer Anordnung unmöglich wäre. Die Eichung auf eine bestimmte Konstante erfolgt dadurch, daß der als Bremse wirkende Stahlmagnet verschoben wird. Je weiter sich dieser Magnet von dem Mittelpunkte der Aluminiumscheibe befindet, desto geringer ist seine Einwirkung auf dieselbe.

Die ganze Bauart und das Zählwerk sind so berechnet, daß ein Teilstrich des ersten Zeigers einer Ampèrestunde beziehungsweise Hektowattstunde entsprechen kann. Die Scheibe unterhalb der mittleren der fünf Scheiben des Zählwerkes, Fig. 101, dient samt ihrem Zeiger als Umdrehungszähler. Der ganze Mechanismus ist in ein Zinkgehäuse eingeschlossen und durch Bleiplomben vor unbefugtem Öffnen geschützt.

Der Stromverlauf ist aus Fig. 100 genau zu ersehen. Der Hauptstrom fließt durch die stark gezeichneten Leitungen. Der Nebenschluß N zweigt an zwei Punkten der Hauptleitung (dünne Striche) ab. Die Windungen des Elektromagneten P sind in zwei gesonderte Abteilungen unterteilt. Je eine Hauptleitung führt durch je eine Windungsabteilung. In Fig. 100 sind auch die Wechselstrommaschine und die Glühlampen L veranschaulicht. Bezüglich der ausführlicheren Theorie der Motorzähler wird auf die besondere Quelle [1]) verwiesen. Als weitere Bauarten von Wechselstromzählern seien genannt die Zähler von Schallenberger, Duncan, Hartmann & Braun und Hummel. Alle diese Zähler finden in der elektrotechnischen Industrie Verwendung.

58. Ferraris-Zähler für Wechselstrom und Drehstrom der Siemens & Halske A.-G.[2]).

1. Der Ferraris-Zähler für Wechselstrom und Drehstrom ist ein reiner Wattstundenzähler nach Ferrarischem Grundsatze. Er ist sehr einfach gebaut und besteht im wesentlichen aus einem Eisenring a, Fig. 102, mit vier nach innen gerichteten Polansätzen $e\,e\,f\!f$. Innerhalb

[1]) Th. Bruger, Über Theorie der Motorzähler, Elektrotechnische Zeitschrift, 1895, S. 675 und 1902, S. 581.

[2]) Nach einer Druckschrift der Siemens & Halske A.-G.

des Eisenringes *a* befindet sich in geringerem Abstande von den Polansätzen ein ebenfalls feststehender Eisenzylinder *c*; über ihn ist eine äußerst leichte Aluminiumtrommel *b* gestülpt, welche um die Achse *d* drehbar angeordnet ist. Die Polansätze *ff* erhalten eine vom Nutzstrome durchflossene Wicklung, während die Wicklung der Polansätze *ee* von einem Strome durchflossen wird, der gegen die Verbrauchsspannung 90° Phasenverschiebung besitzt. Durch diese Einrichtung wird die in den Stromverbrauchern auftretende Phasenverschiebung bei der Messung berücksichtigt.

2. Trotz eines sehr geringen Eigenverbrauches — bei 120 Volt etwa 1 Watt im Nebenschluß — besitzt der Zähler eine außerordentlich hohe Empfindlichkeit, so daß er bereits bei 0·25% seiner vollen Belastung anfängt zu zählen. Dagegen zählt er ohne Verbrauchsstrom selbst bei 20% Überspannung nicht und wird so geeicht, daß er von 2% seiner vollen Belastung an auf 3% richtig zählt.

3. Wegen des geringen Gewichtes seines beweglichen Systems spricht der Zähler auf Stromänderungen fast augenblicklich an und ist gegen Erschütterungen vollkommen unempfindlich. Es ist also nicht notwendig, die Ferraris-Zähler an erschütterungsfreien Wänden aufzuhängen.

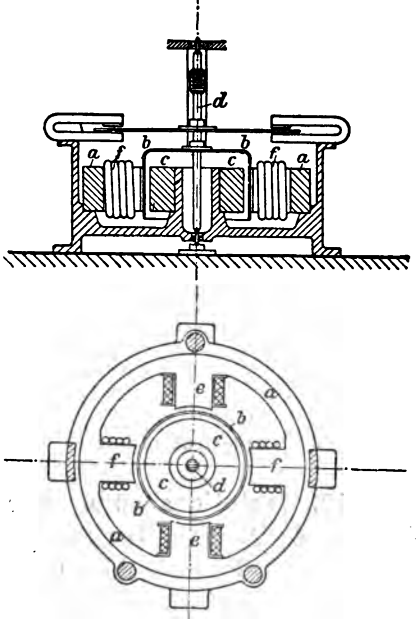


Fig. 102.
Ferraris-Zähler der Siemens & Halske A.-G.

4. Äußere magnetische Felder beeinflussen die Angaben des Zählers nicht.

5. Vorübergehende Überlastungen bis 100% verträgt der Zähler ohne Schaden.

6. Die Ablesung ist die denkbar einfachste, da das Zählwerk springende Zahlen besitzt, die den Verbrauch unmittelbar ziffermäßig in Kilowattstunden ablesen lassen. Bei Drehstrom mit ungleicher Belastung der Zweige erfolgt die Zählung durch zwei gesonderte Vorrichtungen; der Verbrauch ergibt sich aus der Summe der von beiden gezählten Kilowattstunden.

7. Der Ferraris-Zähler erfordert für Ströme bis 300 Ampère und

Spannungen bis 550 Volt keine zusätzlichen Vorrichtungen. Zähler für Stromstärken von mehr als 300 Ampère erhalten gesonderte Stromtransformatoren, Zähler für Spannungen von mehr als 550 Volt gesonderte Drosselspulen.

8. Zur Befestigung der Zähler werden auch besondere Zählerbretter oder Zählerkasten geliefert. Die Benützung von Zählerkasten ist besonders für Betriebsspannungen von mehr als 250 Volt empfehlenswert.

Fig. 103 gibt eine äußere Ansicht dieses Zählers wieder.



Fig. 103. Ferraris-Zähler der Siemens & Halske A.-G.

59. Isolationsprüfer für Wechselstrom der Siemens & Halske A.-G. Der Isolationsprüfer für Wechselstrom, Fig. 104 bis 106, ist nach Ferrarisschem Grundsatze gebaut. Er besteht im wesentlichen so wie der Ferraris-Zähler, Fig. 102 (Horizontalschnitt), aus einem Eisenring *a* mit vier nach innen gerichteten Polansätzen *e e*, *f f*. Innerhalb des Eisenringes *a* befindet sich in geringen Abständen von den Polansätzen ein ebenfalls feststehender Eisenzylinder *c*; über ihm ist eine äußerst leichte Aluminiumtrommel *b* gestülpt, die um die Achse *d* drehbar angeordnet ist. Beide Polansätze sind bewickelt. Je zwei gegenüber liegende Bewicklungen gehören zu einem Stromkreis. Der eine Stromkreis ist in Hintereinanderschaltung mit einer Drosselspule an die beiden Netzklemmen *N N*, Fig. 104, angeschlossen. Der zweite Stromkreis ist einerseits an eine Klemme, anderseits an die Klemme eines Umschalters angeschlossen.

Von einem Teile der Bewicklung ist eine Abzweigung durch einen Widerstand ebenfalls nach zwei Klemmen des Umschalters gemacht.

Der Umschalter enthält 2×4 Kontakte. In der ersten Stellung verbindet der Schalter zwei Tot-Kontakte, in der zweiten Umschalter-

stellung ist folgender Stromkreis geschlossen: Von der linken Netzklemme N zu der Klemme L, von da durch den Umschalter, den Widerstand und einen Teil der Wicklung zur rechten Netzklemme N.

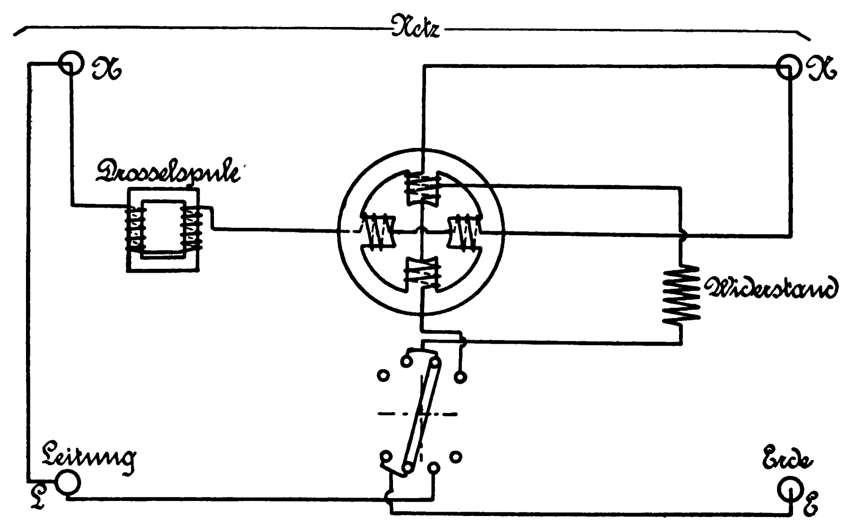


Fig. 104. Schaltung des Isolationsprüfers der Siemens & Halske A.-G.

In der dritten Stellung des Umschalters, die in Fig. 104 dargestellt ist, ist die Verbindung von Erde durch den Umschalter, Widerstand, einen Teil der Wicklung zur rechten Netzklemme hergestellt. In der vierten Umschalterstellung besteht die Verbindung von Erde durch die gesamte Wicklung zur rechten Netzklemme N.

In der ersten Kommutatorstellung ist demnach nur der eine Stromkreis mit der Drosselspule eingeschaltet, in der zweiten Kommutatorstellung ein Teil der zweiten Wicklung in Hintereinanderschaltung mit einem Widerstand noch parallel zum Netz gelegt. Es erhalten also beide Stromkreise vom Netz Strom; allerdings von verschiedener Phasenverschiebung. In der dritten Stellung erhält der eine Stromkreis nur dann Strom, wenn zwischen Klemme L und Erde noch eine außerhalb des Isolationsprüfers bestehende Verbindung herrscht, also ein Isolationsfehler vorliegt; und zwar erscheint der Strom

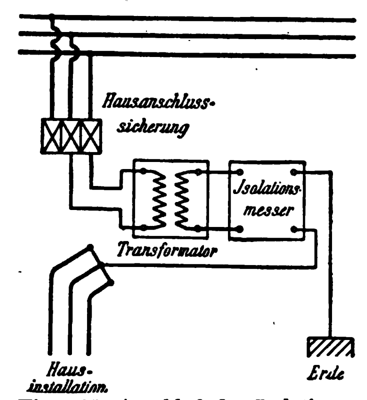


Fig. 105. Anschluß des Isolationsprüfers der Siemens & Halske A.-G. an eine Hausinstallation.

bei stärkerem Isolationsfehler um so stärker. In der letzteren Stellung ist in den Stromkreis zwischen L und der rechten Netzklemme N die ganze Wicklung des Isolationsprüfers eingeschaltet, in dieser Schaltung wird der Isolationsprüfer daher bedeutend empfindlicher durch Isolationsfehler beeinflußt.

Die eine Schaltung dient daher zur Auffindung von großen, die andere zur Auffindung von kleinen Isolationsfehlern.

Ein Drehmoment der Trommel wird an der Aluminiumtrommel stets dann erzielt, wenn die Ströme nach den beiden Stromkreisen in Phase verschoben sind. Die künstliche Verschiebung des einen Strom-

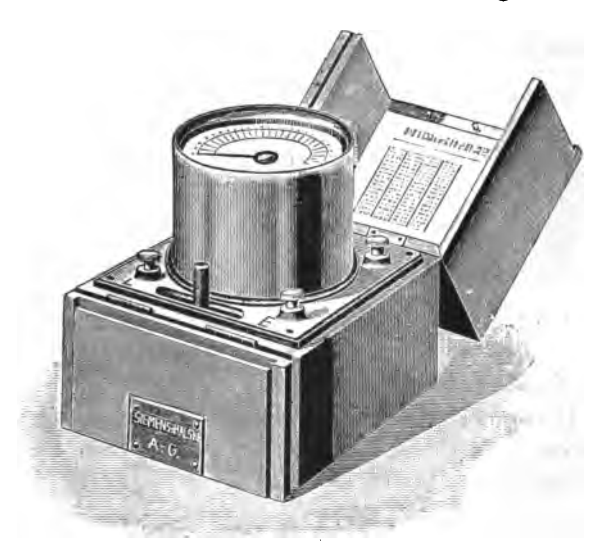


Fig. 106. Isolationsprüfer der Siemens & Halske A.-G.

kreises von nahezu 90° wird durch Einschaltung der Drosselspule erreicht. Das Drehmoment ist hiebei proportional der Spannung an den Klemmen NN. In Stellung 3 und 4 des Umschalters ist das Drehmoment umgekehrt proportional dem Isolationswiderstand der Leitung, zuzüglich des im Instrument liegenden Widerstandes.

Ein etwa auftretender Kapazitätsstrom übt keine Wirkung aus, da er gegen den Leitungsstrom 90° Phasenverschiebung hat (S. 56).

Die Aluminiumtrommel ist oben mit einem Zeiger verbunden, welcher über einer Teilung spielt. Durch eine Spiralfeder wird die Trommel so eingestellt, daß sich der Zeiger über dem Nullpunkt der Teilung befindet. Das Drehmoment der Aluminiumtrommel wirkt entgegengesetzt dem Drehsinn der Spiralfeder. Es zeigt der Zeiger in Stellung 2 des Umschalters die Spannung an den Klemmen NN, beim

Schalten des Umschalters auf Stellung 3 und 4 die Isolationswiderstände an.

Die Messung ist außerordentlich einfach, man verbindet die Klemmen NN mit der Wechselstromquelle, die Klemme L mit derjenigen Leitung, deren Isolation untersucht werden soll, die Klemme E legt man an Erde. Bei Stellung 2 des Umschalters gibt der Isolationsprüfer die Netzspannung, also die Prüfspannung an. In Stellung 3 ist der Isolationsprüfer zunächst auf geringe Empfindlichkeit gebracht. Zeigt hiebei der Isolationsprüfer nur geringen Ausschlag, so schaltet man den Umschalter auf Stellung 4; Netzspannung und Isolationswiderstand können dann an der Teilung direkt abgelesen werden.

Es ist häufig nicht statthaft, unmittelbar mit der zur Verfügung stehenden Spannung des Netzes die Isolation der Leitungen, z. B. Hausinstallationen zu messen, um bei etwaigen groben Isolationsfehlern Kurzschlüsse zu vermeiden. Man bedient sich hiebei eines kleinen Transformators, dessen Übersetzungsverhältnis 1 : 1 sein kann, und schließt an die sekundären Klemmen dieses Transformators den Isolationsprüfer an den Klemmen NN an. Es ist so der Prüfstromkreis vollkommen isoliert von dem Netzstromkreis und etwaige Isolationsfehler bringen keine Störungen hervor. Der kleine Transformator kann so eingerichtet sein, daß der sekundäre Teil etwa das Doppelte der Netzspannung hat, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, mit doppelter Spannung die Isolationsprüfung vorzunehmen.

Da die beweglichen Teile des Isolationsprüfers gegen äußere Stöße wenig empfindlich sind, so erscheint es nicht nötig, den Isolationsprüfer besonders festzuhalten, er kann infolgedessen stets sofort gebraucht werden. Es ist ferner nicht erforderlich, den Isolationsprüfer besonders horizontal einzurichten, da er genaue Werte gibt, auch wenn er nicht horizontal steht.

Der Isolationsprüfer befindet sich in einem leichten, verschließbaren Holzkasten, mit handlichem Griff und besteht aus einem Kasten, dem eigentlichen Prüfer, Drosselspule, Widerstand und Umschalter. Der Transformator wird besonders in einem kleinen Gehäuse, ebenfalls mit Handgriff, eingebaut.

Der Ferraris-Isolationsmesser wird mit Isolationstransformator für 110 Volt Netzspannung für 0 bis 1 Megohm Isolationswiderstand, für 222 Volt Netzspannung für 1 Meßbereich von 0 bis 2 Megohm, für 500 Volt für 1 Meßbereich von 0 bis 5 Megohm hergestellt.

Fig. 105 zeigt den Anschluß des Isolationsprüfers an eine Hausinstallation, Fig. 106 ein Gesamtbild dieser elegant ausgeführten Vorrichtung.

Der Prüfer ist mit einer Gradteilung, einer Spannungs- und einer Ohmteilung versehen. Je nach der Stellung des in der Figur 106 erkennbaren Umschalters kann man das Instrument zu Spannungsmessungen benützen oder den Isolationswiderstand bei geringerer oder höherer Empfindlichkeit messen. Die Eichung erfolgt für 50 Perioden und für die normale Spannung (110, 220 oder 500 Volt). Abweichungen der Spannung oder Periodenzahl bis $\pm$ 10% sind zulässig. Der Isolationswiderstand kann unmittelbar auf der Ohmteilung abgelesen werden, wenn die normale Spannung vorhanden ist; für andere Spannungen dient die Gradteilung und eine dem Instrument beigegebene Tabelle oder Formel, welche z. B. lautet:

$$R_E = \left(\frac{E}{500}\right)^2 (\text{Ablesung} + 75) - 75 \text{ Kiloohm.}$$

(Instrument der k. k. Staatsgewerbeschule, Wien X.)

Gebrauchsanweisung.

1. Man stelle den am Isolationsmesser befindlichen Umschalter auf Stellung 1 und schließe die Klemmen NN an die vorhandene Netzspannung an.

In dieser Schaltung darf der Zeiger keinen Ausschlag geben.

2. Die Klemme E verbinde man gutleitend mit der Erde (Wasserleitung).

Die Klemme L schließe man an die auf Erdschluß zu prüfende, außer Betrieb befindliche Leitung an.

3. Stellt man den Umschalter auf Stellung 2, so gibt der Zeiger auf der Voltteilung die an den Klemmen NN herrschende Spannung an.

4. In Stellung 3 des Umschalters gibt der Zeiger auf der Kiloohmteilung den Isolationswiderstand an, wenn an den Klemmen NN die normale Netzspannung vorhanden ist.

Bei abweichender Spannung bediene man sich der am Deckel befindlichen Tabelle.

5. Will man den Isolationswiderstand zweier Leitungen gegeneinander messen, so schließt man die Klemme E nicht an die Erde, sondern an die andere Leitung an.

6. Darf die Netzspannung zur Messung nicht direkt benützt werden, so lege man die Primärklemmen des Isolationstransformators an die Netzspannung und verbinde seine Sekundärklemmen mit den Klemmen NN des Isolationsmessers.



60. Vorrichtung zur Bestimmung der Periodenzahl eines Wechselstromes.[1])

Die Periodenzahl eines Wechselstromes läßt sich mit Hülfe verschiedener Methoden bestimmen. Die einfachste derselben ist die, aus der gemessenen Umdrehungszahl des Generators oder eines von diesen angetriebenen Synchronmotors und der Polzahl der Maschine auf die Periodenzahl zu schließen. Eine solche Methode, welche auf 0·01% genau ist, stammt von W. Marek.[2]) Weitere Methoden sind u. a. die von Zenneck[3]) und Weinhold[4]) angegebenen mit Zuhülfenahme der Braunschen Röhre, die stroboskopische Methode von Benischke,[5]) die Methode mit Benützung der Lichtenbergschen Staubfiguren von König,[6]) ferner die Methode von G. W. Meyer,[7]) bei der die Periodenzahl aus der Verlängerung eines dünnen, von Wechselstrom umflossenen Eisendrahtes, infolge der durch die Hysteresis in ihm erzeugten Wärme, bestimmt wird.

Eine besondere Gruppe von Methoden[8]) sind akustischer Natur. Die älteste derartige Methode ist die, aus der Tonhöhe eines Eisenkernes, der sich in einer von Wechselstrom durchflossenen Spule befindet, auf die Periodenzahl des Wechselstromes zu schließen. Im Jahre 1896 schlug Campbell[9]) vor, die Eigenschwingungszahl eines schwingenden Körpers gleich der Schwingungs-(Perioden-)Zahl eines Wechselstromes zu machen.

Der betreffende Körper schwingt dann unter dem Einflusse des Wechselstromes durch Resonanzwirkung, und aus dem dadurch bedingten akustischen oder optischen Effekt wird auf die Gleichheit von Perioden- und Eigenschwingungszahl geschlossen. Ein Instrument, bei dem die Eigenschwingungszahl einer Stimmgabel durch Verschiebung von Laufgewichten an ihren beiden Zinken geändert und welche durch die Einwirkung einer von Wechselstrom durchflossenen Spule in Schwingung versetzt wird, wurde von Stöckhardt[10]) angegeben. Wenn die Eigenschwingungszahl der Stimmgabel mit der der Periodenzahl übereinstimmt, dann schwingt die Stimmgabel mit einem Tonmaximum. Nachdem die Schwingungsamplituden der Stimmgabel klein sind, ist man bei dieser Methode nur auf das Gehör angewiesen und die Einstellung bei der Messung mit dieser Vorrichtung leidet unter der erfahrungsgemäßen Mangelhaftigkeit einer Einstellung lediglich nach dem Gehör.

Kempf-Hartmann[11]) verwendet bei seiner Vorrichtung eine Reihe von einseitig eingespannten, auf bestimmte Eigenschwingungszahlen abgeglichenen Stahlzungen, vor welchen ein von Wechselstrom erregter Elektromagnet bewegt wird. Diejenige Zunge, welche mit der größten Amplitude schwingt, zeigt die gesuchte Periodenzahl. Diese Methode hat den Vortheil, daß man die Übereinstimmung der Periodenzahl mit der Eigenschwingungszahl nicht nur mit dem Gehör, sondern auch mit dem Auge feststellen kann, nachdem die Stahlzungen mit großen Amplituden schwingen. Schwer dürfte es

---

[1]) Josef Löwy, Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, S. 597.

[2]) W. Marek, Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 641.

[3]) Zenneck, Elektrotechnische Zeitschrift, 1899.

[4]) Weinhold, Elektrotechnische Zeitschrift, 1901.

[5]) Benischke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1899.

[6]) König, Wiedem. Ann., 1899.

[7]) G. W. Meyer, Elektrotechnische Zeitschrift, 1897.

[8]) E. Rosenberg, Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 246, Zeitschrift für Elektrotechnik, 1899, Heft 25.

[9]) Campbell, Phil. mag., 1896.

[10]) Stöckhardt, Elektrotechnische Zeitschrift, 1890.

[11]) Kempf-Hartmann, Elektrotechnische Zeitschrift, 1901.

bei diesem Instrumente fallen, die Stahlzungen ein- für allemal auf eine bestimmte Eigenschwingungszahl abzugleichen, man denke nur an den Einfluß der Temperatur, wobei man sich überdies für gewöhnlich begnügen muß, diese Abgleichung höchstens auf einer genau vorzunehmen, so daß man die Zehntel der Periodenzahl zu schätzen gezwungen ist. Außerdem besitzt das Instrument den Nachteil, daß man für jedes Periodenzahlintervall eine besondere Reihe von Stahlzungen braucht. Die Vorteile dieser Methode ohne deren Nachteile besitzen jene Apparate, welche als schwingenden Körper eine Metallsaite verwenden. Die Eigenschwingungszahl dieser Saite kann sehr einfach entweder durch Veränderung ihrer Länge oder durch Veränderung ihrer Spannung bei jeder Messung von neuem vollkommen genau eingestellt werden, und die Übereinstimmung der Periodenzahl mit der Eigenschwingungszahl ist für das Auge und das Gehör deutlich erkennbar. Im folgenden soll nun eine von Josef Löwy gebaute, in der elektrotechnischen Werkstätte der k. k. Staatsgewerbeschule in Wien, X., nach diesem Grundsatze hergestellte Vorrichtung besprochen werden, die sehr einfach aufgebaut ist, eine rasche Messung bei vielfältiger Verwendungsmöglichkeit zuläßt und sehr genaue Ergebnisse liefert.

Wenn eine Saite, die an ihren Enden fest eingespannt ist, als Ganzes stehend schwingt, dann beträgt ihre Schwingungszahl in der Sekunde:

$$n = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\,l\sqrt{\frac{q\,.\,s}{g\,.\,p}}} \;\ldots\ldots\; 1.$$

In dieser Gleichung bedeutet T die Schwingungsdauer, l die Länge, q den Querschnitt, s das spezifische Gewicht und p die Spannung der Saite. g ist die Beschleunigung der Schwere. Die Gleichung 1 können wir auch so schreiben:

$$n = \frac{1}{2\sqrt{\frac{q\,.\,s}{g}}}\,.\,\frac{\sqrt{p}}{l} = C\,.\,\frac{\sqrt{p}}{l} \;\ldots\ldots\; 2,$$

wobei

$$C = \frac{1}{2\sqrt{\frac{q\,.\,s}{g}}} \;\ldots\ldots\; 3.$$

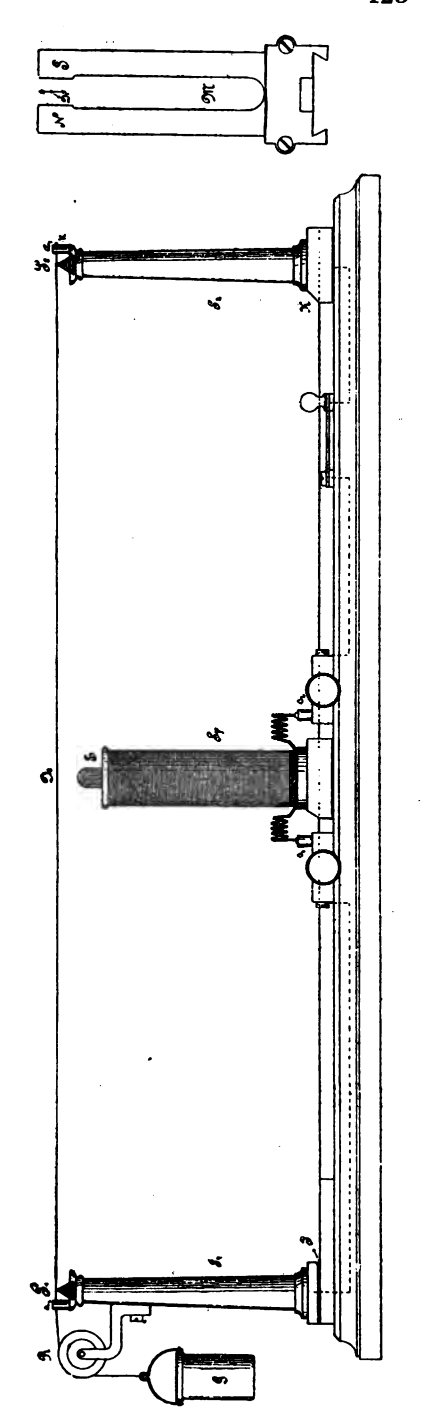
C stellt einen konstanten, von der Beschaffenheit des Drahtes abhängigen Wert dar.

Wenn wir die Saite durch Einwirkung eines Wechselstromes in Schwingung versetzen, dann wird das Schwingen derselben von 2 Faktoren beeinflußt. Erstens von der Elastizität des Drahtes, der zufolge derselbe mit einer Schwingungszahl n schwingen will, und zweitens von der Wirkung des Wechselstromes, infolge welcher der Draht entsprechend der Periodenzahl P des Wechselstromes zu schwingen sucht.

Die Beeinflussung der Schwingungen des Drahtes durch einen Wechselstrom kann in zweierlei Weise herbeigeführt werden.

Denken wir uns, entsprechend der einen Methode, Fig. 107, einen Messingdraht Dr, der an seinen Enden fest eingespannt ist und in dessen Mitte die Pole N und S eines permanenten Magneten angeordnet sind.

Wenn der Wechselstrom durch den Draht in der Richtung hinter die Papierebene fließt, dann wird der Draht infolge der Wechselwirkung von Strom und Feld in der Richtung des einfachen Pfeiles bewegt. Dieser Bewegungsimpuls, der gleichbedeutend ist mit dem Inbewegungsetzen des Drahtes durch den Strich eines Bogens, versetzt den Draht in jenen Schwingungszustand, demzufolge derselbe mit einer Schwingungszahl n in der Sekunde schwingt. Wenn der Wechselstrom durch den Draht in der Richtung



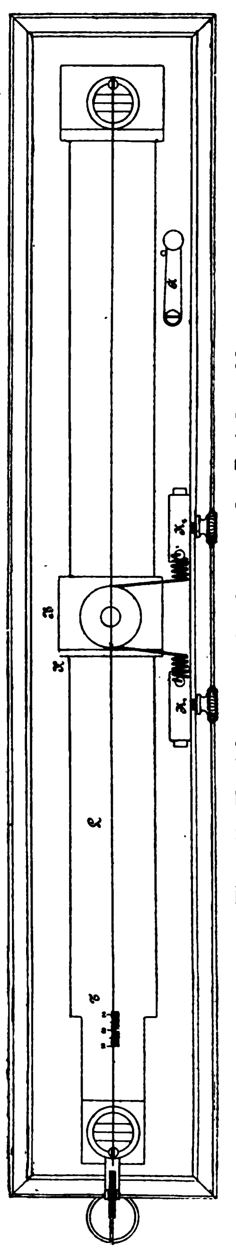


Fig. 107. Vorrichtung zur Bestimmung der Periodenzahl.

gegen das Auge des Beschauers fließt, dann wird der Draht durch die Wirkung des Feldes in der Richtung des doppelten Pfeiles bewegt. Es ist klar, daß, wenn der Strom jedesmal, sobald der Draht infolge seiner Eigenschwingung nach abwärts schwingt, den Draht in der Richtung durchfließt, wodurch derselbe infolge der Wechselwirkung von Feld und Strom ebenfalls nach abwärts geführt wird, und jedesmal, wenn der Draht infolge seiner Eigenschwingung nach aufwärts schwingt, durch den Draht in entgegengesetzter Richtung fließt, daß sich dann die Eigenschwingungen des Drahtes und die Schwingungen des Drahtes infolge der Wechselwirkung von Strom und Feld unterstützen. Diese Bedingung ist durch die Gleichung ausdrückbar:

$$P = n = \frac{1}{2\sqrt{\frac{q \cdot s}{g}}} \cdot \frac{\sqrt{p}}{l} = Cm \cdot \frac{\sqrt{p}}{l} \; \ldots\ldots \; 4,$$

in welcher Gleichung Cm eine von der Beschaffenheit des verwendeten Messingdrahtes abhängige konstante Größe bedeutet. Wenn also bei diesem Experiment die Saite als Ganzes stehend schwingt, dann brauchen wir nur aus Gleichung 2, deren Größen uns ja alle bekannt sind, die Schwingungszahl n zu rechnen und haben dadurch auch schon die gesuchte Periodenzahl P gefunden.

Eine zweite Methode, den Draht unter dem Einfluß eines Wechselstromes schwingen zu lassen, besteht darin, daß man, Fig. 107, einen weichen Eisendraht über dem Pole eines in dessen Mitte angeordneten, von einem Wechselstrom erregten Elektromagneten E schwingen läßt. Bei dieser Methode ist zu bedenken, daß, gleichviel ob der erregte Magnetpol dadurch, daß der Strom einmal in der einen Richtung und einmal in der anderen Richtung durch dessen Spule fließt, einmal ein Nord- und das anderemal ein Südpol ist, der Eisendraht jedesmal von dem Pole angezogen und dadurch in der gleichen Richtung bewegt wird. In der Zeit, in welcher der Wechselstrom die Schwingung einer halben Periode, entsprechend der Erzeugung eines Nord- und eines Südpoles, ausführt, wird demgemäß der Draht bereits eine ganze Schwingung vollführt haben müssen. Bei diesem Versuch wird demnach das stehende Schwingen des Drahtes dann eintreten, wenn die Schwingungszahl des Wechselstromes halb so groß ist als die Eigenschwingungszahl des Drahtes, das heißt, wenn

$$P = \frac{n}{2} = \frac{1}{4\sqrt{\frac{q \cdot s}{g}}} \cdot \frac{\sqrt{p}}{l} = Ce \cdot \frac{\sqrt{p}}{l} \; \ldots\ldots \; 5.$$

Ce ist wieder eine Konstante, die nur von den bekannten Größen des Drahtes abhängt.

Das Anpassen des schwingenden Drahtes an die Periodenzahl des Wechselstromes kann, entsprechend unserer Gleichung 2, auf zweierlei Weise erfolgen. Wir können entweder die Länge des Drahtes unverändert lassen und bloß dessen Spannung durch das Anhängen verschieden großer Belastungen variieren oder bei konstanter Belastung dessen Länge ändern. Im ersten Falle wäre bei der Benützung des Messingdrahtes die Periodenzahl aus der Gleichung zu rechnen.

$$P = n = \frac{1}{2\,l\sqrt{\frac{q \cdot s}{g}}} \cdot \sqrt{p} = C'm \cdot \sqrt{p} \; \ldots\ldots \; 6,$$

wobei

$$C'm = \frac{Cm}{l} \; \ldots\ldots \; 7,$$

und bei der Benützung des Eisendrahtes aus der Gleichung

$$P = \frac{n}{2} = \frac{1}{4\,l\sqrt{\frac{q\,.\,s}{g}}} = C'e\,.\,\sqrt{p}\;\ldots\ldots\;8,$$

wobei

$$C'e = \frac{Ce}{l}\;\ldots\ldots\;9.$$

Wenn wir die Spannung konstant lassen und die Länge des Drahtes ändern, dann gelten beziehungsweise die Gleichungen:

$$P = n = \frac{\sqrt{p}}{2\sqrt{\frac{q\,.\,s}{g}}}\,.\,\frac{1}{l} = C''m\,.\,\frac{1}{l}\;\ldots\ldots\;10.$$

$$C''m = Cm\,\sqrt{p}\;\ldots\;11 \text{ und}$$

$$P = \frac{n}{2} = \frac{\sqrt{p}}{4\sqrt{\frac{q\,.\,s}{g}}}\,.\,\frac{1}{l} = C''e\,\frac{1}{l}\;\ldots\ldots\;12.$$

$$C''e = Ce\,\sqrt{p}\;\ldots\ldots\;13.$$

Die Versuche sind derart auszuführen, daß man den Wechselstrom durch den betreffenden Leiter schickt und nun allmählich entweder die Spannung oder die Länge des Drahtes so lange ändert, bis der Draht vollständig gleichmäßig als Ganzes stehend schwingt. Nachdem der Magnetpol immer in der Mitte des schwingenden Drahtes angeordnet sein muß, ist es bequemer, die Länge der Saite unverändert zu lassen und bloß die Spannung derselben zu ändern, um dadurch einem Verschieben des Poles gleichzeitig mit dem Verändern der Drahtlänge auszuweichen.

Eine entsprechend dem vorher Gesagten gebaute Vorrichtung ist durch Fig. 107 dargestellt.

Auf einem Holzsockel B ist ein Messinglineal L aufgeschraubt. Auf diesem Lineal ist eine von demselben durch die Isolation I isolierte Säule S_1 fest angebracht. Eine zweite, von dem Lineal L nicht isolierte Säule S_2 ist auf demselben verschiebbar. Gleichfalls auf dem Lineal verschiebbar angeordnet ist ein Elektromagnet E. Die Enden der Spule Sp desselben sind mit Hülfe von Steckkontakten s_1 s_2 mit den Klemmen K_1 K_2 zu verbinden. Die Klemme K_2 führt zu einem Ausschalter A, der seinerseits mit der Säule S_2 leitend verbunden ist, während die Klemme K_1 mit der Säule S_1 in leitender Verbindung steht. Auf dem Kopfe der Säulen S_1 und S_2 sind Prismen P_1 P_2 angeordnet, deren Schneiden die Länge eines gespannten Drahtes Dr begrenzen. Dieser Draht ist in den Spalt eines Aufsatzes a_1 eingelegt, hält mit Hülfe des Knopfes k an diesem fest, führt sodann auf der anderen Seite des Apparates durch den Schlitz eines Aufsatzes a_2, hierauf über eine Rolle R und trägt an seinem Ende ein Messinggefäß S. Die Versuche haben gelehrt, daß die Veränderung des Belastungsgewichtes nur allmählich erfolgen darf, und daß die Einstellung dieser Belastung eine ungemein empfindliche ist. Aus diesem Grunde wurde von der Anordnung einer Schale zur Aufnahme von Belastungsgewichten abgesehen und statt dessen das Gefäß S angeordnet, in welches zum Zwecke der Belastung Schrotkügelchen geworfen werden. Nach beendeter Einstellung wird behufs Ermittlung der Größe dieser Belastung das Gefäß auf einer genauen Wage gewogen. Die Versuche haben ergeben, daß die Einstellung sozusagen auf drei Schrotkügelchen genau ist.

Wenn der Elektromagnet E verwendet wird, dann wird der Wechselstrom durch die Spule Sp geschickt und als schwingender Draht ein weicher Eisendraht gewählt.

Bei diesem Experiment ist der Schalter A offen und der Wechselstrom wird durch die Klemme K_1 und K_2 der Spule Sp zugeführt.

Soll der Versuch mit dem Messingdraht ausgeführt werden, dann wird der Elektromagnet E auf dem Lineal nach links verschoben, beim Ausschnitt in dem Lineal von diesem abgehoben und an einer Stelle der permanente Magnet M, Fig. 107, aufgeschoben. Der Schalter A wird geschlossen, so daß jetzt der Wechselstrom von der Klemme K_2 durch den Schalter A, die Säule S_2, den Draht Dr und die Säule S_1 der Klemme K_1 zufließt.

Um die Einstellung der verschiebbaren Säule S_2 und der Magnete E und M auf dem Lineale genau vornehmen zu können, ist das Lineal mit einer Millimeterteilung T versehen.

Die Ablesung der Einstellungen erfolgt dann mittels der Kanten K.

Wir wollen nun einige mit dem Apparate ausgeführte Versuche mitteilen.

Als Eisendraht wurde ein 0·3 *mm* starker, weicher Eisendraht verwendet. Nachdem das Produkt $q \cdot s$ in der Gleichung das Gewicht des Drahtes für eine Längeneinheit bedeutet, wurde dieses mit der Wage direkt bestimmt und ergab 0·004913 *g* per Zentimeter Länge. Der verwendete Messingdraht war ebenfalls 0·3 *mm* stark, das Produkt $q \cdot s$ betrug bei ihm 0·005250 *g* für ein Zentimeter Länge. Aus diesen Größen ergaben sich die Werte für die Konstanten mit $Cm = 217 \cdot 391$ und $Ce = 113 \cdot 636$. Der durch die Spule Sp, welche 10 Lagen mit 136 Windungen eines 0·5 *mm* starken Kupferdrahtes trägt, geschickte Wechselstrom betrug 1·5 A, der durch den Messingdraht geleitete Strom 2·5 A. Der Wechselstrom wurde von einer vierpoligen selbsterregenden Wechselstrommaschine erzeugt, die ein Gasmotor antrieb, der gleichzeitig, zum Zwecke der Aufladung einer Akkumulatorenbatterie, eine Gleichstrommaschine trieb. Die gefundenen Daten für die Periodenzahl des Wechselstromes lassen bei dem durch andere Versuche erprobten genauen Arbeiten der Vorrichtung die kleinen Schwankungen der Umlaufszahl der angetriebenen Wechselstrommaschine mit großer Genauigkeit erkennen.

Von Interesse ist es, zu bemerken, daß die Periodenzahlen der zweiten, nachfolgend angegebenen Versuchstabelle, deren Versuche gegen das Ende der Ladung der Batterie vorgenommen wurden, höher sind als die Periodenzahlen bei den durch die erste Tabelle dargestellten Versuchen, welche in der ersten Ladeperiode der Batterie stattfanden, was sich dadurch erklärt, daß gegen das Ende der Ladung die Gleichstrommaschine weniger Strom zu liefern hatte, wodurch der Gasmotor, weniger belastet, rascher lief und infolgedessen auch die Wechselstrommaschine rascher antrieb. Bei den Versuchen wurde der Draht auf verschiedene Längen eingestellt, hierauf jedesmal der Magnet in die Mitte des Drahtes gebracht und sodann die Belastung so lange allmählich geändert, bis der Draht völlig gleichmäßig als Ganzes stehende Schwingungen vollführte, was sich auch durch einen gleichmäßigen Ton dem Gehör zu erkennen gab. Wenn die Eigenschwingungszahl des Drahtes und die Periodenzahl des Wechselstromes noch nicht völlig übereinstimmen, dann lassen sich im Schwingungszustand der Saite Schwebungen dadurch erkennen, daß die Saite nicht dauernd gleichmäßig schwingt, sondern daß die stehende Welle in regelmäßig aufeinander folgenden Intervallen vollständig verschwindet. Die Größe des jeweiligen Intervalles hängt vom Grade der Verschiedenheit der beiden Schwingungszahlen ab. Will man darum sehr genau messen, dann ist es notwendig, den Schwingungszustand der Saite einige Zeit zu verfolgen. Die Versuche haben gelehrt, daß so geringe Verschiedenheiten der Schwingungszahlen, welche Schwebungen herbeiführen, deren Intervalle eine Minute und mehr betragen können, am Apparate deutlich erkennbar sind.

Die erhaltenen Versuchsresultate waren die folgenden:

I. Versuch.

Weicher Eisendraht, Elektromagnet E, $Ce = 113{\cdot}636$.

l cm	p g	$\sqrt{p}$ g	$\frac{\sqrt{p}}{l}$	$P = Ce\,.\frac{\sqrt{p}}{l}$	$t = \frac{P\,.\,60}{2}$
60	450	21·213	0·354	40·227	1206·81
55	373	19·313	0·351	39·886	1196·58
50	300	17·321	0·346	39·318	1179 54
45	250	15·811	0·351	39·886	1196·58
40	190	13·784	0·345	39·204	1176·12
35	150	12·247	0·350	39·773	1193·19
30	108	10·392	0·346	39·318	1179·54
20	75	8·660	0·346	39 318	1179·54

II. Versuch.

Messingdraht, Permanenter Magnet M, $Cm = 217{\cdot}391$.

l cm	p g	$\sqrt{p}$ g	$\frac{\sqrt{p}}{l}$	$P = Cm\,\frac{\sqrt{p}}{l}$	$t = \frac{P\,.\,60}{2}$
60	120	10·955	0·182	39·565	1186·95
55	95	9·747	0·177	38·478	1154·34
50	89	9·434	0·189	40·087	1232·61
45	74·2	8·613	0·191	41·522	1245·66
40	63	7·937	0·198	43·043	1291·29
35	46	6·782	0·194	42·174	1265·22

Wir ersehen aus den angeführten Versuchstabellen, daß es mit Hülfe der beschriebenen Vorrichtung möglich ist, die Periodenzahl eines Wechselstromes in kurzer Zeit ungemein einfach und genau zu bestimmen. Wie schon früher erwähnt, ist es am besten, die einmal eingestellte Länge des Drahtes ungeändert zu lassen und den Draht durch Wahl der entsprechenden Belastung in den stehenden Schwingungszustand zu versetzen. Behufs Eichung der Vorrichtung werden hierauf die vorhin berechneten Größen $C'e$ und $C'm$ bestimmt. Eine Messung der Periodenzahl nach letzterer Methode erfordert trotz aller Genauigkeit kaum eine Minute. Wird bei Anwendung der Vorrichtung die Belastung konstant gewählt und die Länge des Drahtes geändert, dann muß Vorsorge getroffen werden, daß bei der Verschiebung der Säule S_2, zwecks Einstellung der Vorrichtung, gleichzeitig der Magnet verschoben wird, und zwar nur halb soviel als die Säule, damit er sich immer in der Mitte des eingespannten Drahtes befindet, oder es müßten sich aus gleichem Grunde beide Säulen gleichzeitig um gleich viel gegeneinander bewegen. Bei einer solchen Vorrichtung könnte die Skala auf dem Lineal gleich nach Periodenzahlen oder Umlaufszahlen geeicht sein, welche Ziffern etwa an der Kante K der Säule S_2 abgelesen würden. Diese Vorrichtung wäre demgemäß nicht nur als unmittelbar zeigender genauer Periodenzahlmesser, sondern auch, bei Wechselstrommaschinen gleicher Polzahl, als unmittelbar zeigender, genauer Umlaufszähler zu gebrauchen, dessen praktische Verwendung in kurzer Zeit zu ungleich genaueren Ergebnissen führt als etwa die Anwendung der gebräuchlichen Umdrehungszähler. Auch die Vorrichtung, bei dem die Einstellung durch Veränderung der Belastung erfolgt, ist als Umdrehungszähler zu verwenden, man braucht ja nur die gefundene Periodenzahl durch die Anzahl der Polpaare der Maschine zu dividieren und mit 60 zu multiplizieren, wenn wir die Umlaufszahl auf eine Minute beziehen.

Bei unseren oben angeführten Versuchen beträgt die Anzahl der Polpaare der Maschine 2. Die in den Tabellen in der 6. Kolonne angeführten Zahlen sind die auf dem eben bezeichneten Wege gefundenen Umlaufszahlen der Maschine in der Minute.

Die besprochene Vorrichtung kann somit im Laboratorium und im Versuchsraum bei der Untersuchung von Wechselstrom-Generatoren und -Motoren reiche Verwendung finden, beispielsweise auch als genauer Schlüpfungsmesser.

II. Abschnitt.

Wechselstrommaschinen.

I. Kapitel.

Formeln für die elektromotorische Kraft für Maschinen, Motoren und Transformatoren.

61. Allgemeines. Wir wissen, daß in einem Leiter, der sich in einem magnetischen Felde mit einer gewissen Geschwindigkeit derart bewegt, daß er Kraftlinien schneidet, eine EMK induziert wird. Die absolute Größe dieser EMK ist abhängig von der in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinienzahl, also offenbar direkt proportional der In-

tensität B des magnetischen Feldes, der Länge des Leiters, soweit derselbe mit den Kraftlinien in Berührung steht, und endlich der Geschwindigkeit, mit welcher der Leiter die Kraftlinien durchschneidet (I. T., 2. B., S. 229). Es ist dabei jedoch keineswegs gleichgültig, in welcher Richtung der Leiter bewegt wird. Vergleichen wir Fig. 108 mit Fig. 109, so erkennen wir ohneweiters, wenn wir in beiden Fällen gleiche Induktion B voraussetzen, daß die induzierte EMK, wenn die Geschwindigkeit v, Fig. 109, gleich der Komponente v in Fig. 108 ist, in beiden Fällen gleich ausfällt. Denn es werden sowohl in Fig. 108 als auch in

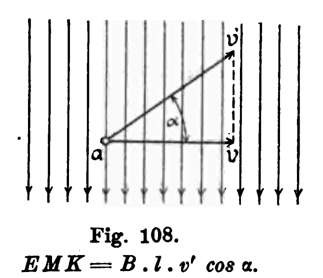


Fig. 108.
$EMK = B . l . v' \cos \alpha$.

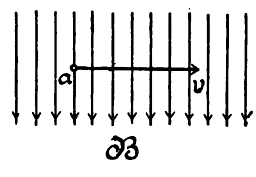


Fig. 109.
$EMK = B . l . v$.

Fig. 109 in gleicher Zeit gleichviel Kraftlinien geschnitten, trotzdem die Leitergeschwindigkeit in dem einen Falle v' ist. Da $v = v' \cos \alpha$ ist, können wir daher setzen:

$$EMK = B . l . v' \cos \alpha = B . l . v.$$

Darin ist B die Induktion (Intensität) für 1 cm^2, l die Leiterlänge in cm und v die Geschwindigkeit in cm, mit welcher der Leiter die Kraftlinien schneidet. Um die EMK in Volt zu erhalten, haben wir noch durch 10^8 zu dividieren (I. T., 1. B., S. 98) und erhalten:

$$EMK \text{ in Volt} = B . l . v . 10^{-8}.$$

Haben wir Z Leiter in Hintereinanderschaltung, so summieren sich die elektromotorischen Kräfte, die in jedem einzelnen Leiter induziert werden, und wir erhalten:

$$EMK = Z . B . l . v . 10^{-8} \text{ Volt (1).}$$

62. Bestimmung der elektromotorischen Kraft einer Gleichstromdynamo und eines Gleichstrommotors. Mit Hülfe der allgemein festgelegten Formel (1) für die EMK soll nun im folgenden ein Ausdruck für die EMK einer Gleichstromdynamo (beziehungsweise eines Motors) abgeleitet werden.

Statt der Geschwindigkeit führen wir die Bezeichnung

$$v = \frac{\pi . D . n}{60}$$

ein. Dabei ist D der Ankerdurchmesser in Zentimetern und n die



minutliche Umdrehungszahl. Die Länge l des Leiters ist, soweit derselbe mit den Kraftlinien in Berührung steht, gleich der Ankerbreite, beziehungsweise der Breite eines Polschuhes.

Schreiben wir für die sekundliche Periodenzahl $\sim = \frac{p \cdot n}{60}$, indem wir mit p die Polpaarzahl bezeichnen, so ist $n = \frac{60 \sim}{p}$.

Führen wir diesen Ausdruck in die für v gefundene Beziehung ein, so erhalten wir: $v = \frac{\pi D \cdot \sim}{p}$. Die Größe $\frac{\pi D}{p}$ stellt nichts anderes als die doppelte Polteilung dar, so daß wir, wenn wir die einfache Polteilung mit τ_p bezeichnen, auch schreiben können:

$$v = 2 \tau_p \cdot \sim.$$

Ist Z die Gesamtzahl der wirksamen Leiter am ganzen Umfange, so haben wir nur $\frac{Z}{2}$ Leiter, infolge der Parallelschaltung der beiden Ankerhälften, für die Berechnung der EMK in Betracht zu ziehen. Wir erhalten daher:

$$EMK = \frac{Z}{2} \cdot B \cdot l \cdot 2 \cdot \tau_p \cdot \sim \cdot 10^{-8} \quad (2).$$

Bezeichnen wir mit N die Gesamtkraftlinienzahl, die aus einem Pol austritt, und mit Q den Querschnitt der Polfläche, so haben wir $B = \frac{N}{Q}$. Ist b_p die Breite des Polbogens, so erhalten wir für Q, da l zugleich die Pollänge ist, $Q = l \cdot b_p$. Setzen wir diesen Wert für Q ein, so wird $B = \frac{N}{l \cdot b_p}$. Aus Gleichung (2) folgt nunmehr:

$$EMK = \frac{Z}{2} \cdot \frac{N}{l \cdot b_p} \cdot l \cdot 2 \tau_p \cdot \sim \cdot 10^{-8} = \frac{Z}{2} \cdot N \cdot \frac{2 \tau_p}{b_p} \cdot \sim \cdot 10^{-8}.$$

Des weiteren ist aber noch in Erwägung zu ziehen, daß von den in Betracht kommenden $\frac{Z}{2}$ Drähten gleichzeitig nur $\frac{Z}{2} \cdot \frac{b_p}{\tau_p}$ Drähte unter einem Pole sind. τ_p stellt dabei, wie bereits erwähnt, die Teilung von Polmitte zu Polmitte dar. Im Verhältnis $\frac{b_p}{\tau_p}$ ist daher der gefundene Ausdruck für die EMK noch umzurechnen, so daß wir erhalten:

$$EMK = \frac{Z}{2} \cdot N \cdot 2 \sim \cdot 10^{-8} = Z \cdot N \cdot \sim \cdot 10^{-8} \quad (3).$$

Diese Formel kann naturgemäß auch ohneweiters für Gleichstrommotoren verwendet werden, da die hier in Betracht kommenden

Größen beim Gleichstrommotor genau von derselben Natur sind, wie bei der Gleichstromdynamo. Während jedoch bei der Dynamo die *EMK* = Klemmenspannung + Spannungsverlust im Anker, ist beim Motor *EMK* = Klemmenspannung — Spannungsverlust im Anker.

Die *EMK* ist bei Gleichstrommaschinen, wie im folgenden gezeigt werden soll, ganz unabhängig von der räumlichen Feldverteilung, also unabhängig von der Feldkurve. Die Formel (1), welche konstantes B über den ganzen Querschnitt voraussetzte, würde, ungleichmäßige Feldverteilung angenommen, in die Gleichung:

$$EMK = \left(\frac{B_1 + B_2 + B_3 + \ldots + B_n}{n}\right) . v . l . 10^{-8} \text{ übergehen.}$$

B_1, B_2 u. s. f. sind verschieden große, in den Anker eintretende Induktionen, n dagegen bedeutet die Anzahl derselben.

Setzen wir für $v = 2\,\tau_p . \sim$ und denken uns jetzt, die Kraftlinien treten infolge der Streuung überdies auf einer größeren Länge, etwa b', als sie der Polbogengröße entsprechen würde, in den Anker ein, so ist der kraftlinienausstrahlende Querschnitt, soweit er für den Anker in Betracht kommt, gleich $b' . l$.

Setzen wir statt $\frac{B_1 + B_2 + B_3 + \ldots + B_n}{n} = B$ mittl., so ist N, der Gesamtkraftlinienfluß pro Pol $= b' . l . B$ mittl., oder:

$$B \text{ mittl.} = \frac{N}{b' . l}.$$

Wir erhalten, wenn wir diesen Wert in

$$EMK = \left(\frac{B_1 + B_2 + B_3 + \ldots + B_n}{n}\right) . v . l . 10^{-8} \text{ einsetzen und}$$

für $v = 2\,\tau_p . \sim$ schreiben,

$$EMK = \frac{N}{b' . l} . 2\,\tau_p . \sim . l . 10^{-8} = \frac{N}{b'} . 2\,\tau_p . \sim . 10^{-8} \text{ für jeden}$$

einzelnen Draht.

Von den $\frac{Z}{2}$ in Betracht kommenden Drähten würden aber jetzt $\frac{b'}{\tau_p} . \frac{Z}{2}$ Leiter gleichzeitig induzierend wirken, so daß wir wieder für die *EMK*, die insgesamt induziert wird, den Ausdruck:

$$EMK = \frac{Z}{2} . \frac{b'}{\tau_p} . \frac{N}{b'} . 2\,\tau_p . \sim . 10^{-8} = Z . N . \sim . 10^{-8} \text{ erhalten.}$$

63. Bestimmung der *EMK* eines Drehstromgenerators und -Motors. Die *EMK*, die in jedem einzelnen Leiter induziert wird, folgt aus der Grundgleichung (1) zu:

$$EMK = B . l . v . 10^{-8}.$$

Setzen wir für v wie bei der Berechnung der EMK einer Gleichstrommaschine den Wert $v = 2\,\tau_p \,.\, \sim$ ein, so ist die in jedem Leiter induzierte

$$EMK = B\,.\,l\,.\,2\,\tau_p\,.\,\sim\,.\,10^{-8}.$$

Wir betrachten im folgenden nur die Vorgänge in einer Phase, da lediglich diese für die Berechnung der EMK in Betracht kommen. Haben wir pro Phase Z Leiter, so wäre die induzierte EMK, wenn immer alle Z Leiter gleichzeitig unter dem Einflusse der Induktion B stehen würden:

$$EMK = Z\,.\,B\,.\,l\,.\,2\,\tau_p\,.\,\sim\,.\,10^{-8} \quad (4).$$

Um nun die EMK zu berechnen, die infolge der Verteilung der Wicklung wirklich in einer Phase von Z Leitern entsteht, denken wir uns nach Gisbert Kapp in Fig. 110 den Nordpol an den Leitern vorbeiwandern.

Wir wählen, um einen gewöhnlich vorkommenden Fall zu erörtern, das Verhältnis $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}} = \frac{b_p}{\tau_p} = \frac{6}{9} = \frac{2}{3}$ und erhalten in Fig. 111 den zeitlichen Verlauf der EMK, die induziert wird.

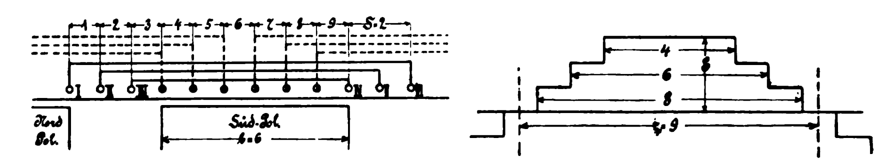


Fig. 110. Zeitlicher Verlauf der induzierten EMK einer Phase eines Dreiphasengenerators. Fig. 111.

Während $\frac{1}{9}$ des Weges wird nur die Leitergruppe I, Fig. 110, von Kraftlinien geschnitten und beträgt während dieser Zeitdauer, wenn wir mit E den Höchstwert der EMK bezeichnen, die entstehen würde, wenn immer alle Z Leiter gleichzeitig unter dem Einflusse des Feldes ständen, die Größe der induzierten EMK $\frac{E}{3}$. Während des zweiten Neuntels ist die EMK, da nunmehr die beiden Leitergruppen I und II von Kraftlinien geschnitten werden, $\frac{2\,E}{3}$, und steigt schließlich im dritten Neuntel, da dann die Leitergruppe III hinzukommt, auf E. Hat der Nordpol 6 Teile zurückgelegt und denken wir uns denselben weiter bewegt, so tritt die Leitergruppe I, da die Polbogenlänge nur

6 Teile umfaßt, wieder aus dem Felde aus und die EMK fällt auf $\frac{2}{3}E$, schließlich auf $\frac{1}{3}E$ und wird dann Null, um endlich auch ihre Richtung zu wechseln. Diese Betrachtung ist in Fig. 111 zur Darstellung gebracht.

Da nun die Meßinstrumente für Wechselstrom die Quadratwurzel aus dem Mittelwerte der Quadrate der augenblicklichen Werte anzeigen, erhalten wir, indem wir diesen Ausdruck bilden, für die gemessene $EMK\,e$ den Wert aus:

$$9\,e^2 = E^2\left[4 \times 1^2 + 2 \times \left(\frac{2}{3}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{3}\right)^2\right],$$

$$3\,e = E\sqrt{4 + \frac{8}{9} + \frac{2}{9}} \text{ zu}$$

$$e = 0{\cdot}752\ E.$$

Wir erhalten nunmehr für die effektive $EMK = e$ den Wert:

$$EMK = e = 0{\cdot}752\ E = 0{\cdot}752\,Z\,.\,B\,.\,l\,.\,2\,\tau_p\,.\sim.\,10^{-8}.$$

Da $l\,.\,\frac{2}{3}\,\tau_p$ den Querschnitt eines Poles, beziehungsweise eine Polschuhfläche darstellt, so ist $B\,.\,l\,.\,\frac{2}{3}\,.\,\tau_p = N$ die Gesamtkraftlinienzahl pro Pol. Daraus ergibt sich B zu:

$$B = \frac{3}{2}\,.\,\frac{N}{l\,.\,\tau_p}\,.$$

Setzen wir diesen Wert ein, so erhalten wir aus Gleichung (4):

$$EMK = 0{\cdot}752\,.\,Z\,.\,\frac{3}{2}\,.\,\frac{N}{l\,.\,\tau_p}\,.\,l\,.\,2\,\tau_p\,.\sim 10^{-8} =$$

$$= \mathbf{2{\cdot}26\,.\,Z\,.\,N\,.\sim.\,10^{-8}} \quad (5)$$

als endgültige Formel.

Allgemein erhalten wir für den Drehstrom sowie auch für den Ein- und Zweiphasengenerator für die EMK den Ausdruck:

$$EMK = k\,.\,Z\,.\,N\,.\sim.\,10^{-8}.$$

Dabei ist k abhängig vom Verhältnis $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}}$, von der Anordnung der Spulen, der Nutenzahl pro Pol und Phase und von der Form des Feldes. Naturgemäß gilt dieselbe allgemeine Formel auch für den Ein-, Zwei- und Dreiphasenmotor.

Nur haben wir es in diesem Falle nicht mit einem Felde von konstanter Intensität, das an den Leitern vorbeiwandert, sondern mit einem mehr oder weniger pulsierenden Drehfelde zu tun, dessen zeitlicher Verlauf der Intensität auf den Faktor k einwirkt.

Die Bestimmung von k für einen Drehstrommotor wird später für einen besonderen Fall durchgeführt.

Wie aus Formel 3 zu ersehen ist, hat auch die Gleichung der EMK des Gleichstromgenerators (beziehungsweise Motors) den Charakter

$$EMK = k \,.\, Z \,.\, \sim \,.\, N \,.\, 10^{-8}.$$

Nur ist k bei der Gleichstrommaschine gleich eins und unabhängig von den Abmessungsverhältnissen, der Anordnung der Wicklung und der Feldform.

64. Elektromotorische Kraft des Transformators. Beim Transformator liegt die Sache insofern anders, als hier nicht Drähte von Kraftlinien geschnitten werden. Wir haben es hier vielmehr mit einem oszillierenden Felde zu tun, das von einer bestimmten Anzahl hintereinander geschalteter Windungen umschlossen wird.

Bezeichnen wir mit T die Zeitdauer einer Periode und hat das Feld in dem Augenblicke, von dem wir bei unserer Betrachtung ausgehen, den Höchstwert $+N$, so besitzt es nach Ablauf einer halben Periode, d. h. nach der Zeit $\frac{T}{2}$, den Wert $-N$. Während der Zeit $\frac{T}{2}$ hat sich also das Feld vom Werte $+N$ auf den Wert $-N$ geändert, d. h. die Kraftlinienänderung betrug $2N$. Wir erhalten den algebraischen Mittelwert der induzierten EMK, wenn wir die Feldänderung durch die Zeit, in der dieselbe stattfand, dividieren, und finden daher für die mittlere EMK einer Windung den Wert:

$$EMK \text{ mittl.} = \frac{2N}{\frac{T}{2}} \,.\, 10^{-8} = \frac{4N}{T} \,.\, 10^{-8}.$$

Für Z Windungen erhalten wir: $EMK \text{ mittl.} = Z \,.\, \frac{4N}{T} \,.\, 10^{-8}$.

Ist T die Zeitdauer einer Periode, so ist $\sim . T = 1$, oder $T = \frac{1}{\sim}$.

Wir können daher auch schreiben:

$$EMK \text{ mittl.} = Z \,.\, 4N \,.\, \sim \,.\, 10^{-8}.$$

Befolgt nun die Änderung des Kraftlinienflusses das Sinusgesetz, so erhalten wir für den Höchstwert der induzierten EMK, da der Höchstwert der Sinuslinie sich zu ihrem algebraischen Mittelwerte wie $\frac{\pi}{2}$ verhält (S. 30).

$$EMK\,max = \frac{\pi}{2} \,.\, Z \,.\, 4N \,.\, \sim 10^{-8} = 2\pi \,.\, ZN \sim \,.\, 10^{-8}.$$

Um auf den effektiven oder den gemessenen Wert zu gelangen, haben wir noch durch $\sqrt{2}$ zu dividieren und erhalten daher für die effektive EMK den Wert:

$$EMK = \frac{2 \, . \, \pi}{\sqrt{2}} \, . \, Z \, . \, N \, . \sim . \, 10^{-8} = 4{\cdot}44 \, . \, Z \, . \, N \, . \sim . \, 10^{-8} .$$

Auch diese Formel hat den Charakter $k \, . \, Z \, . \, N \, . \sim . \, 10^{-8}$ und gilt, wenn wir nur die EMK einer Phase in Berücksichtigung ziehen, naturgemäß auch für Zwei- und Dreiphasentransformatoren.

II. Kapitel.

Theorie der Wechselstrommaschinen.

65. Theorie. Um die Betrachtungen zu vereinfachen, gehen wir von einer zweipoligen Maschine aus und denken uns das Magnetfeld feststehend und den mit Schleifringen versehenen Anker umlaufend. Der Verallgemeinerung dieses besonderen Falles auf den Fall, bei welchem es sich um den Vorgang in mehrpoligen Maschinen mit sich drehendem Feld in der gewöhnlichen Ausführung handelt, liegt nichts im Wege.

Denken wir uns in Fig. 112 den Anker mit konstanter Winkelgeschwindigkeit im Magnetfelde bewegt, so entsteht in demselben eine EMK. Letztere ist der Anzahl der Ankerwindungen und der beim Umlaufen in jeder derselben stattfindenden Kraftlinienänderung in der Zeiteinheit proportional.

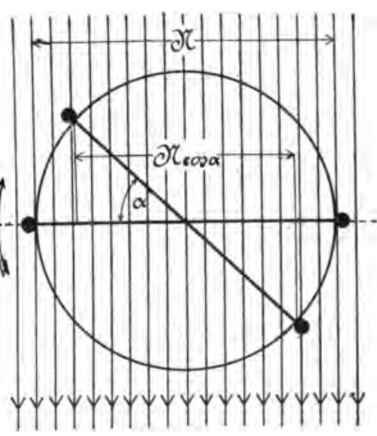


Fig. 112.
Anker in einem Kraftlinienfelde.

Betrachten wir zunächst eine Windung in der wagrechten Ebene. In diesem Falle schließt dieselbe die Gesamtkraftlinienzahl N ein. Denken wir uns die Windung um den Winkel α im Pfeilsinne vorwärts bewegt, so treten nunmehr bloß $N' = N \, . \cos \alpha$ Kraftlinien durch dieselbe. Die diesem Augenblicke entsprechende EMK, die allgemein der Kraftlinienänderung in der Zeiteinheit proportional ist, ergibt sich daher zu:

$$EMK \text{ proportional } - \frac{d\,N'}{d\,t} = \text{proportional } - \frac{d\,N \, . \cos \alpha}{d\,t}.$$

Das negative Vorzeichen bedeutet, daß Kraftlinien und induzierte EMK sich gegenseitig so beeinflussen, daß einer Kraftlinienvergrößerung

in der Spule einer *E M K* entspricht, die dieser Vergrößerung entgegenwirkt und umgekehrt.

Da $- d\,N \,.\, \cos \alpha = N \,.\, \sin \alpha$ ist, hängt also die entstehende *E M K* vom Winkel α, beziehungsweise von der Stellung der betreffenden Windung ab und ändert sich nach dem Sinusgesetz.

Für $\alpha =$ Null wird die induzierte *E M K* Null und erreicht für $\alpha = 90^0$ ihren Höchstwert. Das Feld *N* dagegen hat bei $\alpha =$ Null in der Windung, die gerade in der lotrechten Ebene liegt, seinen größten Wert und ändert sich in einer jeden Windung, verglichen mit der induzierten *E M K*, proportional dem Cosinus des Winkels α (S. 47).

Bringen wir dieses Resultat in Fig. 113 in einem Vektorendiagramm zur Darstellung und ist der Vektor, der bis *N* geht, der Höchstwert der in einer Windung eintretenden Kraftlinien (also gleich *N*), so stellt der bis *E* gehende Vektor die um 90^0 nacheilende *E M K* dar. Die induzierte *E M K* eilt dem Felde nach, da sie erst um 90^0 später als das Feld ihren Höchstwert in einer betrachteten Spule erreicht.

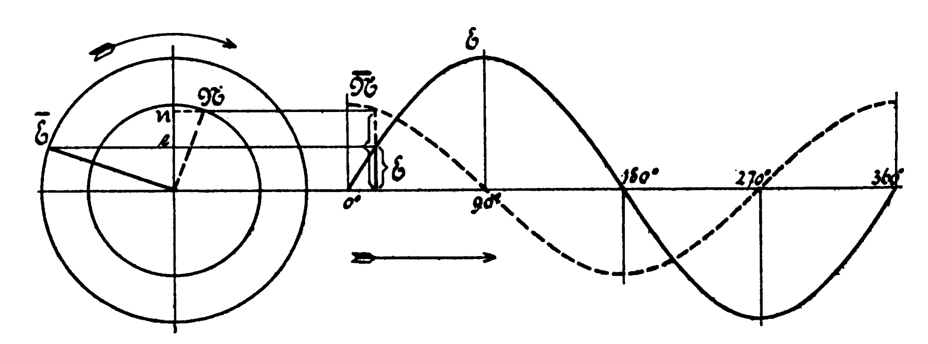


Fig. 113. Kraftlinien und *EMK* im Generator. Vektor- und Wellendiagramm.

Die augenblicklichen Werte der Kraftlinien in den Spulen sind dem $\cos \alpha$, die augenblicklichen Werte der *E M K* im Ständer dagegen dem $\sin \alpha$ proportional. In Fig. 114 wurden die beiden aufeinander lotrecht stehenden Vektoren aus der Figur 113 für Kraftlinien und *E M K* herausgezeichnet.

Belasten wir nun den Anker, indem wir ihn auf einen vorläufig induktionsfrei gedachten Widerstand arbeiten lassen, so wird in den Ankerleitern ein Strom fließen. Die Stromrichtung ergibt sich in Fig. 112 senkrecht zur Zeichenebene und fließen die Ströme in der oberen Hälfte des Ankers vom Beschauer weg, in der unteren Hälfte

des Ankers dem Beschauer zu (S. 5). Dieser Strom schafft nun ein Feld N_2, welches in Fig. 115 angedeutet ist.

In Fig. 115 ist $O\,A = N$ und $O\,C = N_2$. Letzteres N_2 hat dieselbe Richtung (Phase) wie der Ankerstrom, da es von demselben erzeugt wird. Da wir vorläufig induktionsfreie Belastung annehmen, d. h. da induzierte *E M K* und Ankerstrom in Phase sind, hat N_2 auch die Phase der *E M K O B*.

Damit nun das in den Anker eintretende Feld N durch N_2 keine

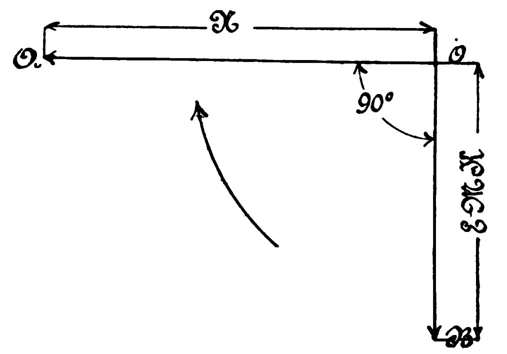


Fig. 114. Kraftlinien und *EMK* im Generator. Vektordiagramm.

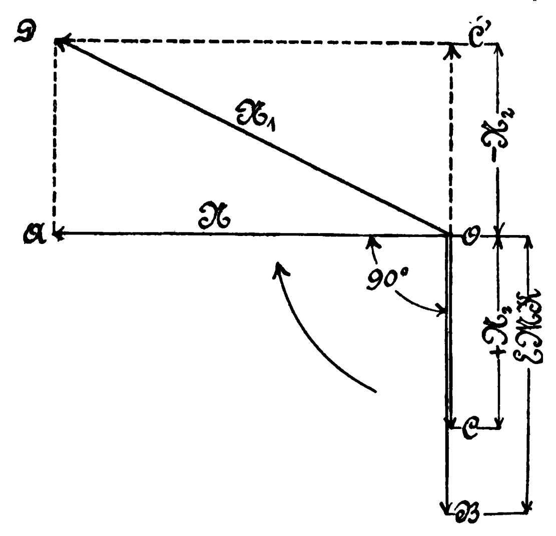


Fig. 115. Feld- und Spannungsdiagramm der belasteten Maschine.

Änderung erfahre, denken wir uns $N_2 = O\,C$ durch ein gleich großes und entgegengesetzt gerichtetes Feld $O\,C'$ aufgehoben. Bilden wir aus $O\,A = N$ und $O\,C' = -\,N_2$ die Resultierende $O\,D$, so zerfällt dieselbe umgekehrt in zwei Komponenten, von denen $O\,A = N$ das die

$E\,M\,K$ induzierende Feld, das in die Ankerwindungen wirklich eintritt, darstellt, während $O\,C'$ das vom Ankerstrom selbst geschaffene Feld $O\,C$ aufhebt. $O\,D$ nennen wir N_1 und stellt N_1 das Feld dar, das entstehen würde, wenn wir bei konstant gehaltener Erregung plötzlich den Strom abschalten, beziehungsweise das Feld $N_2 = O\,C$ verschwinden lassen würden. Nehmen wir an, die Permeabilität des magnetischen Kreises sei für die in Betracht kommenden Erregungen konstant, so können wir die Feldgrößen den sie erzeugenden Ampèrewindungen proportional setzen.

Wir erhalten dann folgendes:

Bei Leerlauf ist zur Erzeugung der gewünschten Spannung ein ganz bestimmtes Feld $O\,A$, beziehungsweise eine diesem Felde $O\,A$ proportionale Ampèrewindungszahl (auf den Magnetschenkeln) nötig. Belasten wir die Maschine induktionsfrei, so ist diese Ampèrewindungszahl, damit das Feld $O\,A$, Fig. 115, erhalten bleibt, zu vergrößern und wird proportional $O\,D$. Das Feld $O\,D$ selbst tritt jedoch in der Maschine selbst nirgends auf. Einzig und allein besteht das Feld $O\,A$, da die Feldkomponente $O\,C$ durch $O\,C'$ aufgehoben wird. Die Ankerstreuung, die im allgemeinen eine unwesentliche Rolle spielt, wurde im folgenden vernachlässigt.

Um dem Ohmschen Spannungsabfall im Anker, den wir im weiteren mit Ständer bezeichnen wollen, Rechnung zu tragen, müssen wir berücksichtigen, daß dieser Spannungsabfall in Phase mit dem Ankerstrome liegt. Denn wenn der Strom seinen Höchstwert erreicht, hat auch der Spannungsverlust ε seinen größten Wert. Damit bei Belastung dieselbe Klemmenspannung auftritt wie bei Leerlauf, muß eine um ε größere $E\,M\,K$ induziert und dementsprechend ein größeres Feld $O\,A'$, Fig. 116, erzeugt werden. Das bedingt eine entsprechend größere Erregung auf den Magnetschenkeln, die proportional $O\,D'$ ist, und zwar wird $O\,D' > O\,D$. Diese Berücksichtigung des Ohmschen Spannungsabfalls in der Ständerwicklung ist in Fig. 116 veranschaulicht.

Wir wollen von einer bestimmten Drehrichtung des Diagrammes nunmehr Abstand nehmen und nur berücksichtigen, daß Felder und sie erzeugende Ampèrewindungen gleiche Phase haben und daß die induzierte $E\,M\,K$ im Diagramm senkrecht zu dem sie erzeugenden Felde stehen muß und diesem ebenfalls proportional ist.

Es ist in Fig. 116:

$i =$ Belastungsstrom (Ständerstrom),

$O\,B = e =$ Spannung an den Ständerklemmen, die bei Belastung und bei Leerlauf gleich groß sein soll,

$O\,E = e + \varepsilon = E\,M\,K$ des Ständers bei Belastung,

$\varepsilon = i \cdot r =$ dem Ohmschen Spannungsabfall im Ständer (r bedeutet dabei den Ohmschen Widerstand der Ständerwicklung),

$O\,C =$ Feld der Ankerrückwirkung,

$O\,A =$ Feld, welches der Spannung e entspricht.

$O\,C$ ist proportional der Ampèrewindungszahl des Ständers, $O\,A$ dagegen proportional der Ampèrewindungszahl, welche auf den Magnetschenkeln vorhanden sein muß, um $O\,A$, beziehungsweise die Spannung

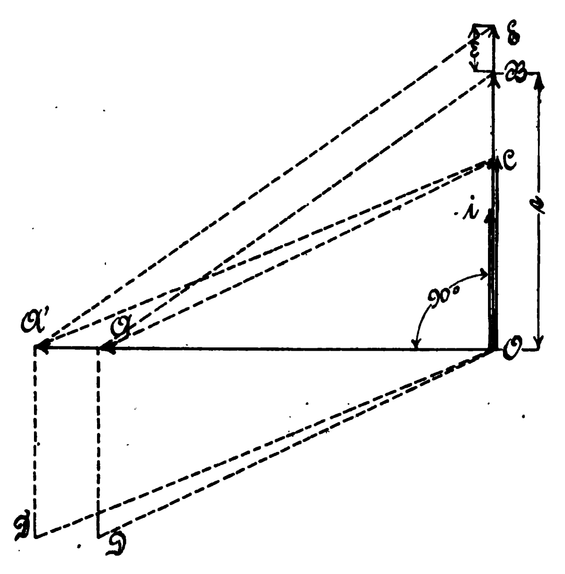


Fig. 116. Feld- und Spannungsdiagramm der belasteten Maschine bei Berücksichtigung des Ohmschen Spannungsverlustes in der Ankerwicklung.

e zu erzeugen, wenn kein Ohmscher Spannungsabfall und keine Ankerrückwirkung vorhanden wäre. Nach dem Vorausgegangenen ergibt sich dann, daß $O\,A'$ das Feld darstellt, welches $e + \varepsilon$, d. h. der $E\,M\,K$ entspricht, und daß $O\,D' = A'\,C$ proportional der Ampèrewindungszahl ist, welche man zur Erzeugung der Spannung e beim Strome i benötigt. Wir haben also für induktionsfreie Belastung folgendes einfache Ampèrewindungsdreieck, das in Fig. 117 dargestellt ist. Diese Darstellung entspricht dem Vorgange Rotherts,[1]) berücksichtigt jedoch nicht die im allgemeinen unwesentlich ausfallende Ankerstreuung.

Belasten wir die Maschine induktiv, d. h. so, daß der Strom i der Spannung e um den Winkel φ nacheilt, so entsteht, da die Ständer-

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1896, Seite 575.

ampèrewindungen und der Spannungsverlust $s = i \cdot r$ immer in gleicher Phase mit i sind, Fig. 118. In dieser Figur ist:

$$O\,E' = O\,E,$$
$$E'\,A' \parallel E\,A,$$
$$O\,A' = O\,A'',$$
$$O\,A'' \perp O\,E.$$

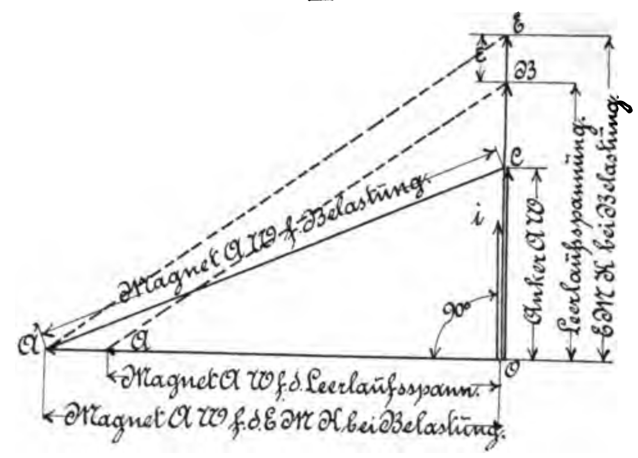


Fig. 117. Diagramm der Ampèrewindungen, der Spannung und des Stromes einer induktionsfrei belasteten Maschine.

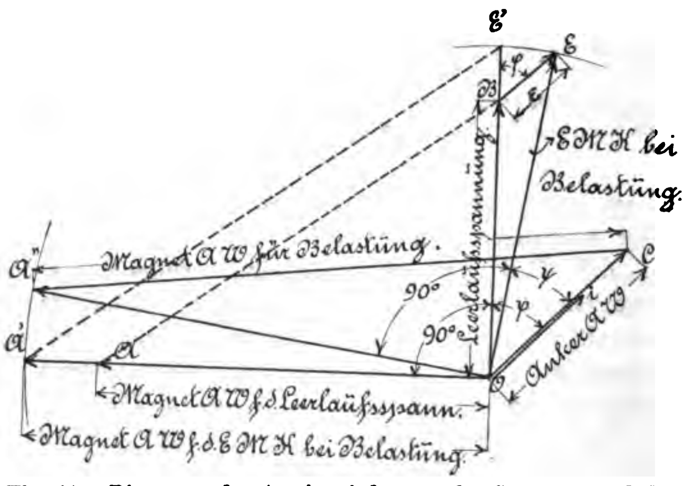


Fig. 118. Diagramm der Ampèrewindungen, der Spannung und des Stromes einer induktiv belasteten Maschine.

Die ganze Konstruktion beruht darauf, daß die Ampèrewindungen $O\,A'$ proportional der $E\,M\,K$ $O\,E$ sein müssen und daß $O\,A''$, da es

zugleich die Richtung des wirklich bestehenden Feldes angibt, senkrecht auf $O\,E'$ stehen muß.

Um die beiden Diagramme, Fig. 117 und 118, auf einen Dreiphasengenerator anwenden zu können, bezieht man sich zweckmäßig auf die Vorgänge, die in einer Phase stattfinden.

Die Ampèrewindungen, die der $E\,M\,K$ entsprechen, werden aus den Sättigungen und den magnetischen Weglängen unter Zuhülfenahme einer Magnetisierungslinie in der üblichen Weise berechnet.

Die Ampèrewindungen des Ständers sind bei Einphasenstrom oszillierender Natur und befolgen, dem Strome entsprechend, das Sinusgesetz.

Ist $\overline{J}$ der Höchstwert des Ständerstromes, z die wirksame Ständerdrahtzahl und berechnen wir alle Ampèrewindungen für ein Polpaar, d. h. für einen magnetischen Kreis, so ist bei $2\,p$ Polen der Höchstwert der Ampèrewindungszahl des Ständers für ein Polpaar:

$$A\,W_2\,max = \overline{J}\,.\,\frac{z}{2}\,.\,\frac{1}{p}.$$

$\frac{z}{2}$ ist dabei die Gesamtzahl der Ständerwindungen. Da nach Ablauf einer Viertelperiode der Strom Null wird, ist auch dann $A\,W_2$ Null geworden. Wir müssen daher mit einem Mittelwerte von $A\,W_2$ rechnen. Derselbe ergibt sich bei sinusförmigem Strome zu:

$$A\,W_2 = \frac{z}{2}\,.\,\frac{1}{p}\,.\,\overline{J}\,.\,\frac{2}{\pi},$$

da ja $\overline{J}\,.\,\frac{2}{\pi}$ den Mittelwert des Stromes während des Verlaufes eines Polwechsels darstellt. Führen wir den Effektivwert i des Stromes ein, so erhalten wir, da $i = \frac{\overline{J}}{\sqrt{2}}$ ist,

$$A\,W_2 = \frac{z}{2}\,.\,\frac{1}{p}\,.\,i\,.\,\sqrt{2}\,.\,\frac{2}{\pi} = 0{\cdot}45\,.\,\frac{z}{p}\,.\,i.$$

Die Ampèrewindungszahl des Ständers einer Zweiphasenmaschine ergibt sich aus folgender Überlegung. Ist der augenblickliche Wert des Stromes in einer Phase $\overline{J}\,sin\,\varphi$, so ist der entsprechende augenblickliche Wert des Stromes in der zweiten Phase, da beide Phasen 90^0 Verschiebung haben, $\overline{J}\,sin\,(\varphi + 90^0) = \overline{J}\,cos\,\varphi$. Diese beiden Ströme fließen nun in Windungen, die 90^0 räumlich voneinander verschoben sind.

Tragen wir die Werte $\overline{J}\,sin\,\varphi$ beziehungsweise $\overline{J}\,cos\,\varphi$ aus Fig. 119 auf den beiden räumlich gedachten Wicklungsebenen I und II,

Fig. 120, die um 90° voneinander verschoben sind, auf und bilden wir die Resultierende, so gibt dieselbe, wenn wir sie mit der Windungszahl $\frac{z}{2}$ multiplizieren, offenbar die Ampèrewindungszahl an, die aus der Zusammenwirkung beider Phasen resultiert. Der Einfachheit halber setzen wir α, Fig. 120, Null, was wir tun können, da ja die

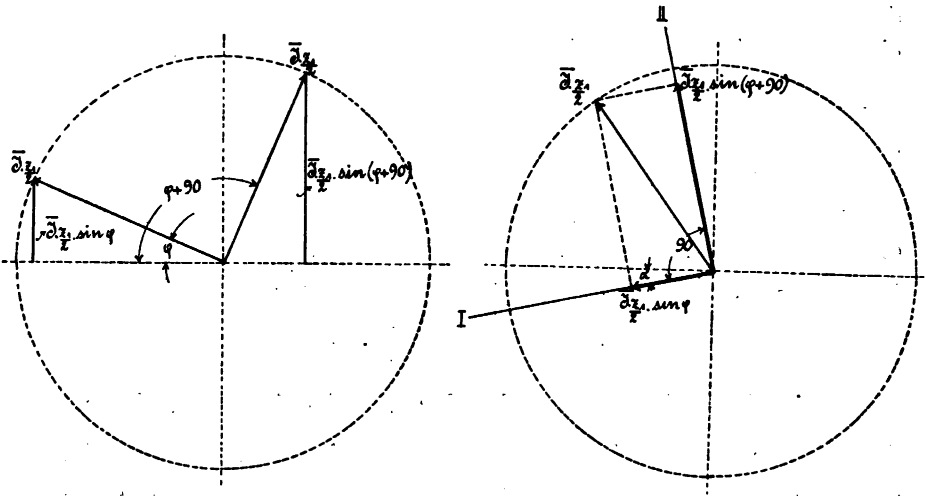


Fig. 119. Zweiphasenstrom. Fig. 120. Zweiphasenstrom.

resultierende Ampèrewindungszahl unabhängig von der gewählten Richtung der Ebene I sein muß, so erhalten wir:

$$AW_2 =$$

$$= \frac{z}{2} \cdot \sqrt{[\overline{J} sin \varphi . sin \alpha + \overline{J} cos \varphi sin (\alpha + 90^0)]^2 + [\overline{J} sin \varphi . cos \alpha + \overline{J} cos \varphi . cos (\alpha + 90^0)]^2}$$

$$= \frac{z}{2} \cdot \sqrt{\overline{J}^2 sin^2 \varphi + \overline{J}^2 cos^2 \varphi} = \frac{z}{2} \cdot \overline{J}.$$

Bei einer Zweiphasenmaschine ist also, da φ in der Endformel nicht enthalten ist, die Ständerampèrewindungszahl für jeden Augenblick konstant. Führen wir statt dem Höchstwert wieder den Effektivwert ein, so erhalten wir:

$$A\ W_2 = \frac{z}{2\,p} \cdot \sqrt{2} \cdot i,$$

wenn wir außerdem die Ampèrewindungszahl für ein Polpaar bestimmen. $\frac{z}{2}$ ist dabei immer die Windungszahl einer Phase.

66. Berechnung der Ampèrewindungen des Ständers eines Dreiphasengenerators.

Ampèrewindungsdiagramm, Fig. 121 (räumlich!).

$A\,W_2 = (i_1 + i_2 + i_3) \cdot \frac{z}{2}$ geometrisch addiert.

Stromdiagramm, Fig. 122 (zeitlich!).
$\overline{J}_1 = \overline{J}_2 = \overline{J}_3 = \overline{J}$, Stromamplitude.
i_1, i_2, i_3 = zeitliche Stromwerte.

I, *II* und *III*, Fig. 122, bedeuten die Windungsebenen der drei Phasen.

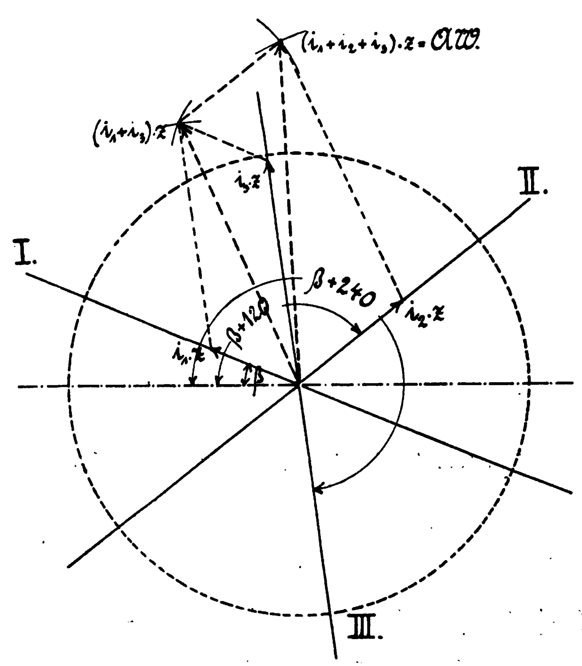


Fig. 121. Ampèrewindungsdiagramm (räumlich).

$\frac{z}{2}$ = Windungszahl einer Phase, $A\,W_2$ = Ampèrewindungszahl aller drei Phasen.

Es ist:

$$A\,W_2{}^2 = \left[\overline{J} \cdot \frac{z}{2} \sin \alpha \sin \beta + \overline{J} \cdot \frac{z}{2} \sin (\alpha + 120^0) \sin (\beta + 120^0) + \right.$$
$$\left. + \overline{J} \cdot \frac{z}{2} \sin (\alpha + 240^0) \sin (\beta + 240^0)\right]^2 + \left[\overline{J} \cdot \frac{z}{2} \sin \alpha \cos \beta + \right.$$
$$\left. + \overline{J} \cdot \frac{z}{2} \sin (\alpha + 120^0) \cos (\beta + 120^0) + \overline{J} \cdot \frac{z}{2} \sin (\alpha + 240^0) \cos (\beta + 240^0)\right]^2.$$

Setzen wir β = Null, was erlaubt ist, und

$$\sin 120^0 = + \frac{\sqrt{3}}{2}, \; \sin 240^0 = - \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$\cos 120^0 = -\frac{1}{2},\ \cos 240^0 = -\frac{1}{2}$$

und heben $\overline{J}^2 \cdot \frac{z^2}{4}$ heraus, so erhalten wir:

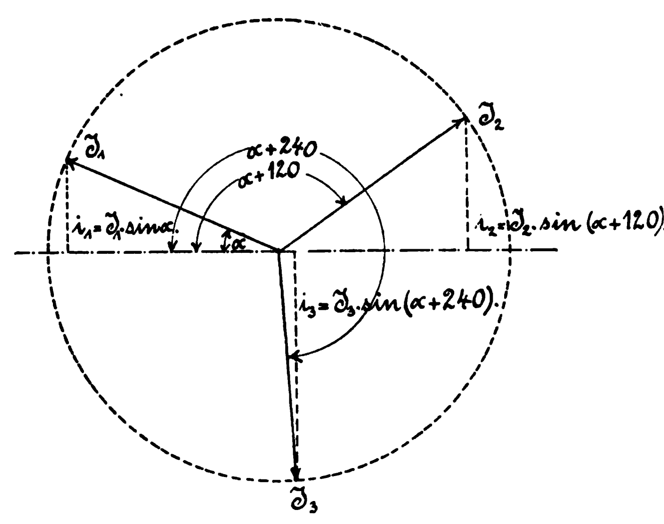


Fig. 122. Ampèrewindungsdiagramm (zeitlich).

$$A\ W_2{}^2 = \overline{J}^2 \cdot \frac{z^2}{4}\left[\frac{3}{4}\sin^2(\alpha+120^0) + \frac{3}{4}\sin^2(\alpha+240^0) - \right.$$

$$- 2 \cdot \frac{3}{4}\sin(\alpha+120^0)\sin(\alpha+240^0) + \sin^2\alpha + \frac{1}{4}\sin^2(\alpha+120^0) +$$

$$+ \frac{-2\sin\alpha\sin(\alpha+120^0)}{2} + \frac{1}{4}\sin^2(\alpha+240^0) +$$

$$\left. + \frac{-2\sin\alpha\sin(\alpha+240^0)}{2} + \frac{2\sin(\alpha+120^0)\sin(\alpha+240^0)}{2 \cdot 2}\right]^2 =$$

$$= \overline{J}^2 \cdot \frac{z^2}{4}\left[\frac{4}{4}\left(\frac{\sin^2\alpha}{4} - \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sqrt{3}}{2} + \frac{3}{4}\cos^2\alpha + \frac{\sin^2\alpha}{4} + \right.\right.$$

$$\left. + \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sqrt{3}}{2} + \frac{3}{4}\cos^2\alpha\right) + \sin^2\alpha - \left(\frac{\sin^2\alpha}{4} - \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sqrt{3}}{4} + \right.$$

$$\left. + \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sqrt{3}}{4} - \frac{3}{4}\cos^2\alpha\right) - \left(\frac{-\sin^2\alpha}{2} + \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sqrt{3}}{2}\right) -$$

$$\left. - \left(\frac{-\sin^2\alpha}{2} - \frac{\sin\alpha\cos\alpha\sqrt{3}}{2}\right)\right] = \overline{J}^2\,\frac{z^2}{4}\left[\frac{9}{4}\sin^2\alpha + \frac{9}{4}\cos^2\alpha\right] =$$

$$= \overline{J}^2 \cdot \frac{z^2}{4} \cdot \frac{9}{4}.$$

$$A\,W_2 = \sqrt{\frac{9}{4}\bar{J}^2 \cdot \frac{z^2}{4}} = \frac{3}{2}\,\bar{J} \cdot \frac{z}{2},$$

für jeden Zeitmoment konstant, da α in der Formel nicht enthalten ist. Die Formel gilt genau nur für eine zweipolige Wicklung, Ströme der Sinusform und Winkel von 120°, ferner nur für die Wicklungsanordnung, Fig. 122.

In Fig. 121 stellen i_1, i_2 und i_3 die augenblicklichen Werte der Ströme eines Dreiphasengenerators dar. Übertragen wir diese Ströme in das Ampèrewindungsdiagramm, Fig. 122, so hätten wir dieselben eigentlich mit $\frac{z}{2}$ zu multiplizieren. Da aber $\frac{z}{2}$ eine Konstante vorstellt, so können wir wohl i_1, i_2 und i_3 unmittelbar übertragen, weil wir auch dann die richtigen Verhältnisse zwischen diesen Größen erhalten.

Ersetzen wir $\bar{J}$ durch den effektiven Wert $i\sqrt{2}$ und führen wir die Polpaarzahl p ein, so erhalten wir für die Ampèrewindungen für ein Polpaar die Formel:

$$A\,W_2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{z}{2} \cdot i \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{1}{p}.$$

Die für die Zwei- und Dreiphasengeneratoren bezüglich ihrer Koeffizienten 1 (Zweiphasengenerator) und $\frac{3}{2}$ (Dreiphasengenerator) abgeleiteten Formeln gelten, streng genommen, nur für eine zweipolige Maschine, da ja die Windungsebenen nur bei dieser 90° beziehungsweise 120° räumlich untereinander einschließen.

Kennen wir die Spannungslinie der Maschine und die zur normalen Spannung (bei Leerlauf) gehörende Ampèrewindungszahl $A\,W$ auf den Magnetschenkeln, so finden wir mit Hülfe des in Fig. 117 und Fig. 118 zur Darstellung gebrachten Verfahrens den Spannungsabfall, der eintritt, wenn bei konstant gehaltener Erregung $A\,W$ — die der Leerlaufsspannung entspricht — die Maschine mit dem normalen (beziehungsweise einem beliebigen) Strome belastet wird.

An dem folgend (S. 154) berechneten Dreiphasengenerator ist dieses Verfahren ausführlich auseinandergesetzt. Es ist üblich, den so definierten Spannungsabfall so zu wählen, daß derselbe bei $\cos\varphi = 1$ 8—10% nicht überschreitet. Im gerechneten Beispiele beträgt derselbe bei $\cos\varphi = 0{\cdot}8$ nur 6% und wurde deshalb so niedrig gewählt, weil der Generator für Bahnzwecke bestimmt ist.

Im allgemeinen kann man zwar gerade bei Generatoren für Kraftzwecke mit dem Spannungsabfall höher gehen, da aber in diesem Falle ganz beträchtliche Belastungsschwankungen auftreten werden und

auch ein nicht unwesentlicher Spannungsabfall in der Leitung zu erwarten ist, entschieden wir uns, um auch bei den größten Belastungsschwankungen ein Nachregulieren der Spannung tunlichst zu vermeiden, für diesen niedrigen Wert des Spannungsabfalls. Die Ermittlung desselben ist später (Berechnung des Drehstromgenerators, S. 169, Fig. 40) zur Darstellung gebracht.

Arbeiten über den Spannungsabfall von Wechselstromgeneratoren stammen von Fritz Niethammer,[1]) J. Fischer-Hinnen,[2]) E. Arnold,[3]) Bragstadt,[4]) Fritz Kesselring[5]) u. a.

III. Kapitel.

Wicklungen der Wechselstrommaschinen. Schleifringe.

67. Allgemeines. Sämtliche Gleichstromwicklungen sind auch für Wechselstrom verwendbar, aber nicht umgekehrt. Wie man aus den Grammeringen der Gleichstrommaschinen Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom abnimmt, wurde bereits an der Hand der Figuren 5 bis 9 erläutert. Ganz ähnliche Betrachtungen gelten für alle Gleichstromwicklungen. Man kann sich in jedem Falle einen Gleichstromkollektor vorhanden denken, von welchem entweder von zwei gegenüberliegenden Lamellen (Einphasenmaschine) oder von drei gleich weit voneinander abstehenden Punkten (Dreiphasenmaschine) durch Schleifringe Strom abgenommen wird. An dieser Stelle soll hauptsächlich nur eine Mehrphasenstromwicklung besprochen werden, welche insbesondere bei größeren Maschinen Verwendung findet, im Gegensatze zu den obigen Gleichstromwicklungen, welche nur bei kleinen Maschinen brauchbar sind. Des weiteren sei auf früheres (I. T., 2. B., S. 134 ff., und I. T., 2. B., S. 197 ff.) verwiesen.

68. Mehrphasen-Wechselstromwicklung. Die modernen Wechselstrommaschinen werden fast ausschließlich durch Gleichstrom erregt (S. 9). In den Figuren 123 bis 125 tritt der Strom der Erreger-Gleichstrommaschine in den Magnetkranz der Wechselstrommaschinen an je zwei Schleifringen ein und erzeugt im Magnetkranz die Pole N_1 S_1, N_2 S_2 u. s. w. Der Regulierwiderstand dient zum Stärken und Schwächen des magnetischen Feldes der Gleichstrom-Erregermaschine. Die Richtungen des Stromes in der letzteren bestimmen sich ohneweiters nach

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 255.
[2]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, Heft 52.
[3]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1902.
[4]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1902.
[5]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 890.

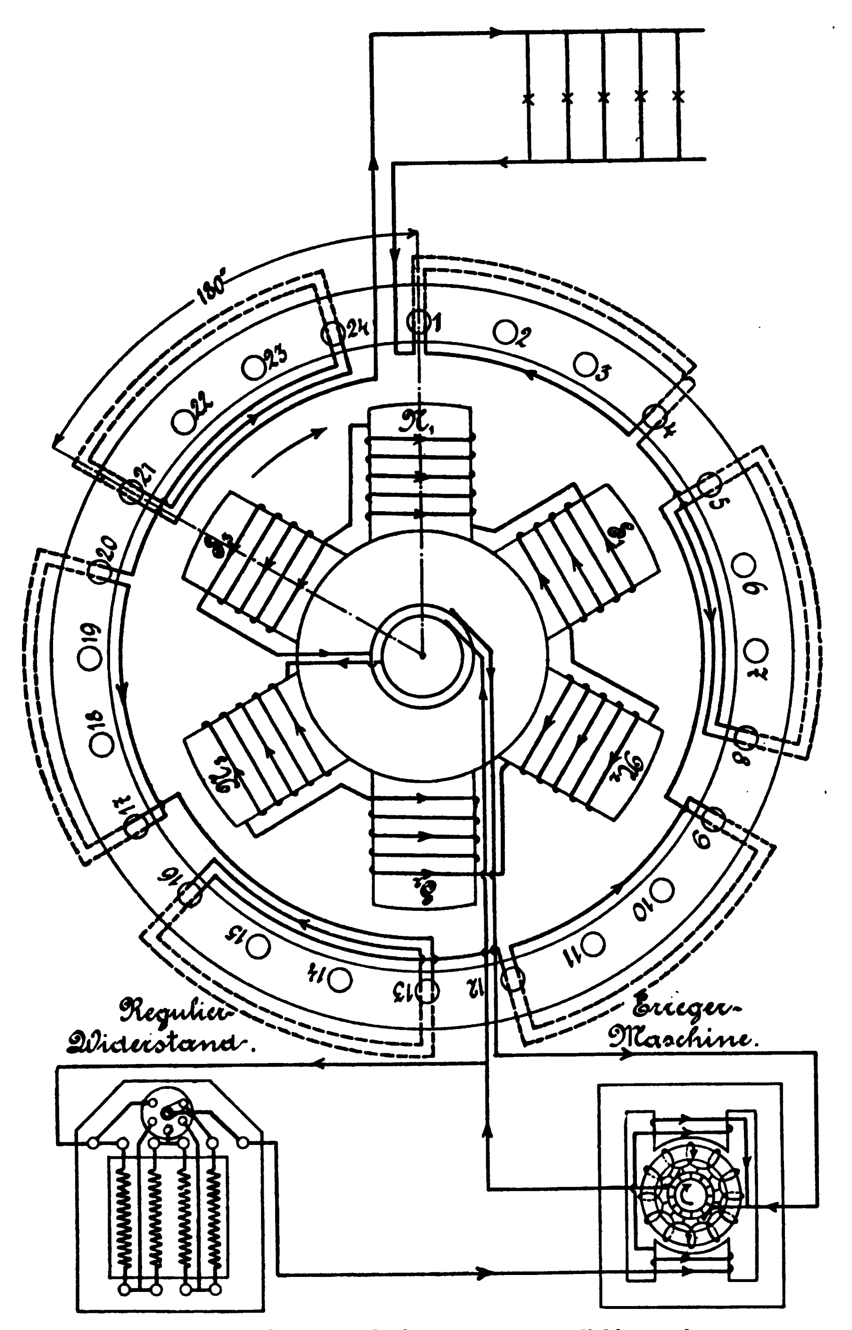


Fig. 123. Einphasen-Wechselstrommaschine. Wicklungsschema.

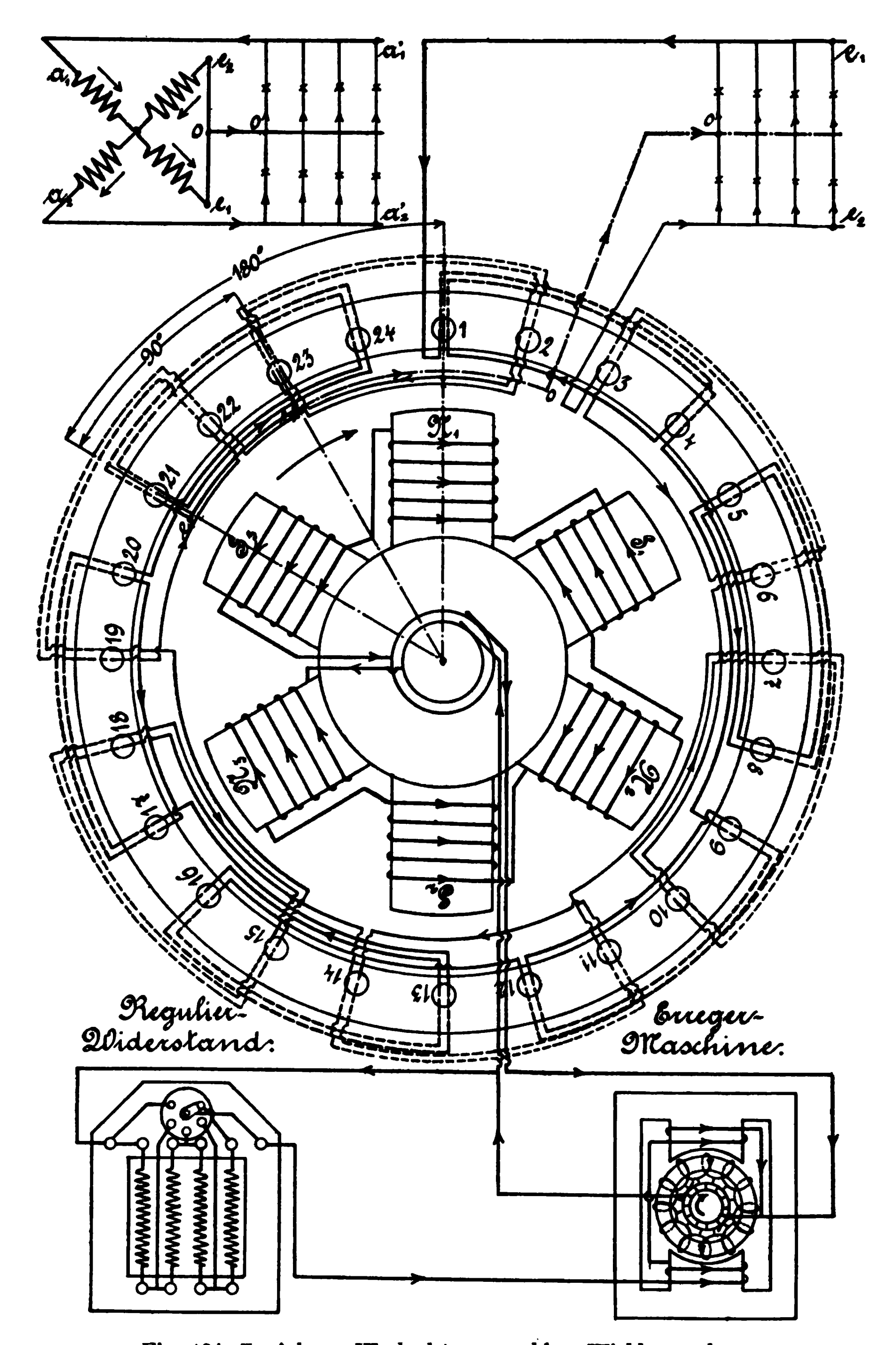


Fig. 124. Zweiphasen-Wechselstrommaschine. Wicklungsschema.

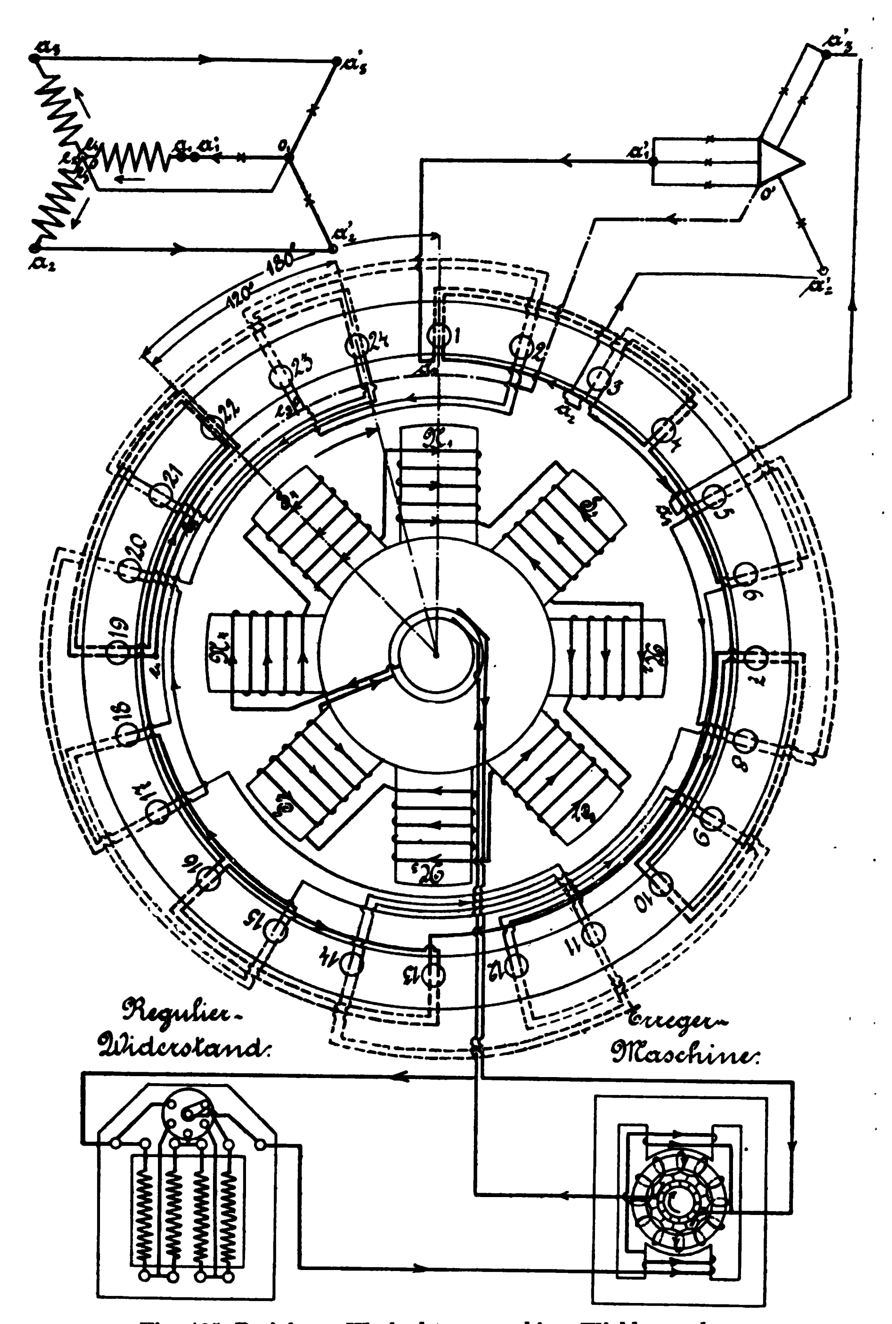


Fig. 125. Dreiphasen-Wechselstrommaschine. Wicklungsschema.

der bereits angegebenen Regel (S. 5, Stromrichtungsregel). In den genannten Figuren sind die Wicklungen sämtlicher Pole N_1 S_1, N_2 S_2 u. s. w. hintereinander geschaltet. Der Magnetkranz besteht aus Weicheisenblechen, welche durch dünnes Papier voneinander isoliert sind. Den gleichen Aufbau hat der Eisenkern des Ankers. Derselbe ist durch die beiden großen konzentrischen Kreise umgrenzt. Bei sehr großen Maschinen bestehen die Eisenbleche des Ankerkernes aus mehreren Teilen. Letztere sind so übereinander gelegt, daß die Trennungsstellen der einzelnen Lagen der Bleche nicht übereinander fallen, sondern sich gegenseitig decken. Der Ankerkern ist, wie es die obigen Figuren zeigen, für Ein- und Mehrphasenmaschinen, z. B. mit 24 Öffnungen versehen, durch welche die Wicklungen (Drähte oder Stäbe) führen. Bezüglich der letzteren sei besonders hervorgehoben, daß dieselben in den Figuren, der Deutlichkeit wegen, mit ihrer Ebene in der Zeichnungsebene liegen, während sie in den praktischen Ausführungen auf der Zeichnungsebene senkrecht stehen, so zwar, daß die stark ausgezogenen Teile der Windungen sich vor und die gestrichelten Teile der Windungen hinter der Zeichnungsebene befinden. Die Anordnung dieser Wechselstromwicklungen der Anker ist aus den Figuren ohneweiters ersichtlich. Alle Spulen sind in gleicher Weise gewickelt, jedoch so verbunden, daß sich die Ströme der einzelnen Spulen addieren, d. h. daß die Stromrichtungen in den einzelnen Phasen miteinander übereinstimmen. Sämtliche Magnetkränze haben Rechtslauf, was durch die eingezeichneten Pfeile ersichtlich gemacht wurde.

Bestimmung der Stromrichtung. In der Gleichstrommaschine ergibt sich die Stromrichtung nach der bereits erwähnten Regel (S. 5). Die Pole in dem Magnetkranze bestimmt man leicht nach der rechten Handregel (I. T., 1. B., S. 46). Die Stromrichtung in den Ankerspulen kann man nach den bereits angeführten Regeln (S. 5) finden. Nach dem Gesetze von Lenz haben induzierender und induzierter Strom stets solche Richtungen, daß die ausgeführte Bewegung zwischen beiden gehemmt wird. Induzierend ist der Gleichstrom im Magnetkranze, induziert wird der Wechselstrom in den Ankerwindungen. Bewegt sich, so wie es Fig. 123 zeigt, der Nordpol N_1 gegen die durch die Öffnungen 1 und 4 gewickelte Spule, so entsteht in dieser ein Strom, welcher von vorn gesehen, dem Strome in N_1 entgegengesetzt gerichtet ist. Es findet demnach zwischen den beiden Spulen (induzierender und induzierter Spule), weil parallel und entgegengesetzt gerichtete Ströme einander abstoßen (I. T., 1. B., S. 53), Abstoßung statt. Dieser Vorgang ist selbstverständlich. Die Bewegung des Magnetkranzes muß ja Kraft kosten, denn wäre das nicht der Fall, so würde in der Wechselstrom-

maschine nicht nur Strom erzeugt, sondern die Maschine würde sich selbst antreiben, also auch als Motor wirken. Befindet sich der Nordpol N_1 in der Mitte der Spule, welche durch die Öffnungen 1 und 4 führt, so findet in dieser Spule Stromrichtungswechsel statt (vergl. Fig. 110). Tritt der Nordpol N_1 über die Mitte der Spule gegen das Ende derselben, so fließt Strom in der entgegengesetzten Richtung. So wie in der einen Ankerspule, erklärt sich die Stromrichtung auch in allen übrigen. Nach einer $^1/_6$-Umdrehung tritt S_3 an die Stelle von N_1 und es wechselt der Strom in sämtlichen Spulen seine Richtung. Der Strom wechselt demnach im Anker nach jeder $^1/_6$-Umdrehung seine Richtung, es ist Wechselstrom. Fig. 123 stellt das Wicklungsschema einer Einphasenmaschine dar. Bei derselben bleibt die Hälfte der Öffnungen offen (ohne Wicklung). Läßt man nur $^1/_3$ der Öffnungen offen, so erhält man die $\sqrt{3}$fache Leistung. Sowohl der Magnetkranz als auch die Ankerspulen bilden je sechs Pole. Bei der Einphasenmaschine ist also die Anzahl der Wechselstrompole des Ankers gleich der Anzahl der Gleichstrompole des Magnetkranzes.

Fig. 124 gibt eine verkettet geschaltete Zweiphasenmaschine wieder. Dieselbe stellt eine Einphasenmaschine mit zwei Ankerwicklungen dar. Die Ströme in den beiden Phasen (schwarz und rot) sind gegeneinander um 90^0 in der Phase verschoben (Fig. 55). In Fig. 124 wurden die Winkel 90^0 und 180^0 eingezeichnet. Bei jeder Gleichstrommaschine entspricht die Entfernung von Pol zu Pol 180^0 (S. 12, Fig. 10). Die Entfernung von S_3 bis N_1 beträgt demnach 180^0. Denselben Abstand müssen zwei Ankerspulen voneinander haben. Betrachten wir die beiden folgenden Spulen:

Erste Spule, gehend durch die Öffnungen 21 und 24, Figur 124. Zweite Spule, gehend durch die Öffnungen 1 und 4. Aus der Figur ersehen wir sofort, daß Beginn der ersten Spule (Öffnung 21) und Beginn der zweiten Spule (Öffnung 1) 180^0 voneinander abstehen. Ebenso stehen die Mitten der Spulen 180^0 voneinander ab.

Von Öffnung 21 bis Öffnung 23 zählen wir 90^0. Beginnt also die eine Phase (schwarz) bei Öffnung 21, so muß die zweite Phase (rot) bei Öffnung 23 beginnen, wenn die beiden Spulen um 90^0 in der Phase gegeneinander verschoben sein sollen. Die Verkettung der Wicklungen ist in Fig. 124 nach dem einfachen Schema in derselben Figur links oben durchgeführt. e_1 und e_2 (Knotenpunkt o) sind untereinander und mit dem Knotenpunkte o' verbunden. Die Anfänge der Wicklungen führen zu e_1 beziehungsweise e_2.

Fig. 125 endlich veranschaulicht das Schaltungsschema einer Dreiphasenmaschine mit verketteter Ankerwicklung, Knotenpunktsleitung

bei ungleicher Belastung der 3 Phasen. Die Anzahl der Wechselstrompole des Ankers beträgt 12, die Anzahl der Gleichstrompole des Magnetkranzes 8. Die Ankerwicklung besteht aus dreimal je vier hintereinander geschalteten Spulen. In dieser Figur sind die Winkel von 180° und 120° besonders ersichtlich. Von S_4 bis N_1 ergeben sich 180°. Betrachten wir nun drei ineinander liegende Spulen verschiedener Phasen. Erste Spule (schwarz), führend durch die Öffnungen 19 und 22. Zweite Spule (rot), gewickelt durch die Öffnungen 21 und 24. Dritte Spule (blau), gehend durch die Öffnungen 23 und 2. Vom Ende der ersten Spule (Öffnung 22) bis Ende der zweiten Spule (Öffnung 24) sind 120°, d. h. die Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Spulen ist wieder 120° u. s. w. Damit ist bewiesen, daß die Phasenverschiebung zwischen je zwei Spulen verschiedener Phase 120° beträgt. Wenn je zwei aufeinander folgende Spulen verschiedener Phase 120° gegeneinander verschoben sein sollen, müssen zwei Spulen derselben Phase, so wie es die Figur zeigt, 360° voneinander abstehen. Während die Ein- und Zweiphasenmaschine bei 24 Ankeröffnungen 6 Pole des Magnetkranzes erfordern, erhalten wir bei der Dreiphasenmaschine 8 Pole des Magnetkranzes. Allerdings ist dann der Abstand zweier Spulen derselben Phase voneinander 360°, während dieser Abstand bei der Ein- und Zweiphasenmaschine 180° betrug. Es werden deshalb aus den Enden der schwarzen Spulen Südpole heraustreten. Die Verkettung der Wicklungen entspricht dem einfachen Schema in derselben Figur links oben. Die Enden e_1, e_2 und e_3 sind miteinander verbunden. Der Knotenpunkt ist mit e_3 o bezeichnet. Die Knotenpunktsleitung führt von e_3 o nach o'. a_1 ist mit der Klemme a_1', a_2 mit der Klemme a_2' und a_3 mit der Klemme a_3' verbunden. Von den Klemmen führen die einzelnen Lampengruppen zum Knotenpunkte o'. In dem Schema befinden sich zwischen a_1' und o' drei Lampen, zwischen a_2' und o' eine Lampe und zwischen a_3' und o' zwei Lampen, um eine ungleiche Belastung der drei Zweige zum Ausdrucke zu bringen.

Bei sehr großen Maschinen besteht der Ankereisenkern, des Transportes wegen, aus zwei Teilen. Man kann sich dann den Ankerkern durch einen wagrechten Schnitt in zwei Teile zerlegt denken. In diesem Falle müssen bei den gewöhnlichen Wicklungsschemen mindestens zwei Spulen ausgewickelt werden. Gisbert Kapp[1]) hat für diesen Zweck eine eigene Wicklung ersonnen.

Die Generatoren werden zumeist in Stern geschaltet. Ausnahmsweise findet bei Lichtbetrieb für Generator und Motor die Dreieck-

[1]) Gisbert Kapp: Dynamomaschine, S. 306.

schaltung Verwendung; letztere besitzt den Vorteil, daß sich die einzelnen Zweige bei ungleichmäßiger Verteilung der Belastung weniger beeinflussen.

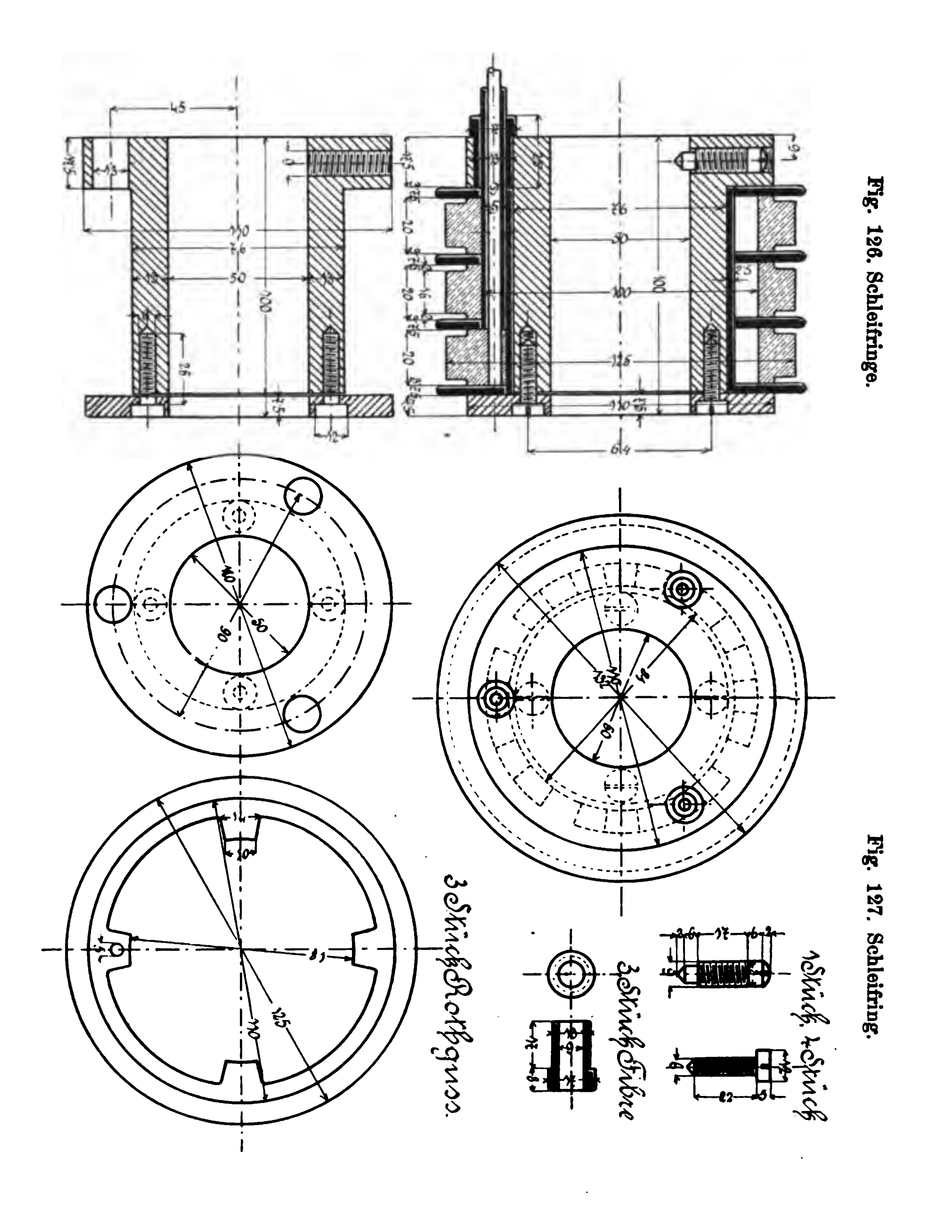


Fig. 126. Schleifringe.

Fig. 127. Schleifring.

Den Aufbau der Schleifringe bringen Fig. 126 u. 127 zur Darstellung. In denselben sehen wir drei Schleifringe (125 *mm* äußerer Durchmesser).

Auf der Welle der Dynamo sitzt zunächst die gußeiserne Büchse (50 *mm* innerer Durchmesser), durch eine Schraube mit der Welle verschraubt. Die Schleifringe sind von der Büchse und untereinander durch Hartgummi oder Fibre isoliert. Schleifringe samt Isolation werden einerseits durch einen Ansatz an der Büchse, anderseits durch eine Endscheibe aneinander gepreßt. Letztere ist durch vier Schrauben (64 *mm* Abstand voneinander) mit der Büchse verbunden. Der Anschluß von zwei Schleifringen an einen Kollektor wurde bereits früher (I. T., 2. B., S. 158) erörtert.

IV. Kapitel.

Berechnung eines Drehstromgenerators.

(Methode Rothert.)

69. Angaben. Drehstromgenerator für 275 *KVA* Leistung für Kraftabgabe.

Gegeben sind:

Umlaufszahl $n = 150$ pro Minute.

Leistung $L = 275\ KVA \cong 220\ KVA$ bei $\cos\varphi = 0{\cdot}8$.

Spannung $e = 5500$ Volt verkettet.

Leistungsfaktor $\cos\varphi = 0{\cdot}8$.

Wechselzahl $W = 80$ in der Sekunde.

70. Polzahl. Die Polzahl sei $2\,p$ und ergibt sich aus:

$$2\,p = \frac{60\,.\,W}{n} = \frac{60 \times 80}{150} = 32.$$

71. Ankerdurchmesser und Ankerbreite. Die Festlegung dieser beiden Abmessungen erfolgt nach der folgenden Formel von Gisbert Kapp:

Volt $\times$ Ampère $= C\,.\,A\,.\,v\,.\,p$.

Darin bedeutet:

A = Polfläche in cm^2,

v = Umfangsgeschwindigkeit des Polrades in *m* (der Generator wird als Wechselpoltype ausgeführt),

p = Zahl der Polpaare,

C = empirischer Koeffizient. Gisbert Kapp gibt C zu 0·8 bis 1·2 für Wechselpole und 100 Wechsel an. Erfahrungsgemäß geben die von Gisbert Kapp für C angegebenen Werte reichlich bemessene Maschinen. C kann daher größer gewählt werden und legen wir C mit 1·4 fest.

Setzen wir den Polbogen $b_g = 0{\cdot}7 \times$ Polteilung τ_g, so ist die **Polfläche:**

$$A\ cm^2 = \underbrace{\left(\frac{D_2 \times \pi}{2\,p} \times 0{\cdot}7\right)}_{b_g} \times B\ tot.$$

D_2 = innerer Durchmesser des Ständers in *cm*.
$B\ tot$ = totale Ankerbreite (oder Polschuhbreite) in *cm*.

Setzen wir die Umfangsgeschwindigkeit $\underset{\text{Meter}}{v} = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60 \times 100}$ ein, so erhalten wir:

$$\text{Volt} \times \text{Ampère} = C \times \overbrace{\left(\frac{D_2\,\pi}{2\,p} \times 0{\cdot}7\right) \times B\ tot}^{A} \times \overbrace{\left(\frac{\pi\,D_2\,n}{60 \times 100}\right)}^{v} \times p =$$

$$= \frac{C \times D_2^{\,2} \cdot \pi^2 \cdot n \cdot B\ tot \cdot 0{\cdot}7}{120 \times 100}.$$

Für $n = 150$, $C = 1{\cdot}4$ und Voltampères $= \frac{\text{Leistung}}{\cos\varphi} = \frac{220 \times 10^3}{0{\cdot}8}$ eingesetzt, gibt:

$$D_2^{\,2} \times B\ tot = \frac{220 \times 10^3 \times 120 \times 100}{0{\cdot}8 \times 1{\cdot}4 \times \pi^2 \times 150 \times 0{\cdot}7} = 23 \times 10^5\ cm^3.$$

Entscheiden wir uns aus wirtschaftlichen Gründen für runde Schenkel und quadratische Polschuhe, so wird wegen der letzteren: $\frac{D_2\ cm \times \pi \times 0{\cdot}7}{2\,p} = B\ tot.$ Wird der linksstehende Wert in der zuletzt gefundenen Beziehung eingesetzt, so ergibt sich:

$$D_2^{\,2} \times B\ tot = \frac{D_2^{\,3} \times \pi \times 0{\cdot}7}{2\,p} = 23 \times 10^5,$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{23 \times 10^5 \times 2\,p}{\pi \times 0{\cdot}7}} = \sqrt[3]{\frac{23 \times 10^5 \times 32}{\pi \times 0{\cdot}7}} \cong 320\ cm.$$

$$\boldsymbol{D_2 = 3200\ mm};\ B\ tot = \frac{D_2 \times \pi \times 0{\cdot}7}{2\,p} \cong 220\ mm.$$

Wir führen $B\ tot$ aus mit: $\boldsymbol{B\ tot = 230\ mm}$, annähernd = dem Polbogen.

Die wirksame Ankerbreite B_w wird, wenn wir zwei Ventilationsspalten à 10 *mm* Breite vorsehen und 10% für Isolation der Ankerbleche rechnen:

$$\boldsymbol{B_w} = 0{\cdot}9\,(230 - 2 \times 10) \cong \boldsymbol{190\ mm}.$$

72. Die Umfangsgeschwindigkeit des Magnetrades ergibt sich zu: $\underset{\text{Meter}}{v} = \frac{\pi \times 3200 \times 150\ T.p.M}{60 \times 1000} \cong 25$ Metern, wenn wir unbe-

rücksichtigt lassen, daß der Polraddurchmesser um den doppelten Luftspalt kleiner ist als der innere Ständerdurchmesser; v beträgt allgemein 20—56 (*max*) Meter.

73. Schenkelquerschnitt, Fig. 128. Es werden runde Stahlpole gewählt, die sich bei einem vorläufig mit 230 *mm* angenommenen Polbogen (der nach Festlegung der Größe des Luftspaltes genau bestimmt wird) folgendermaßen ergeben:

230
30 d_s 30

Fig. 128.
Magnetkranz-Schenkel.

$$d_s = 230 - 2 \times 30 = \mathbf{170}\ mm.$$
$$q_s \cong \mathbf{226}\ cm^2.$$

74. Schenkelsättigung und Kraftlinien $N_2' \times (10^6)$ für einen Pol. Um die Maschine gegen Belastungsschwankungen verhältnismäßig unempfänglich zu machen, sättigen wir hoch und wählen die Schenkelinduktion $B_s = 18 \times 10^3$.

Da $N_2' = q_s \times B_s$ ist, so erhalten wir $N_2' \cong \mathbf{4{\cdot}1 \times 10^6}$.

Die in den Ständer eintretende Kraftlinienzahl N_2 ist geringer und hängt ab von den Nutenabmessungen, der Größe des Luftspaltes und der Polteilung. Für die Praxis genügt es, wenn man bei dieser Type $N_2 = 0{\cdot}85\ N_2'$ setzt.

Wir erhalten $N_2 = 0{\cdot}85 \times 4{\cdot}1 \times 10^6 = \mathbf{3{\cdot}5 \times 10^6}$ Kraftlinien für einen Ständerpol.

75. *E M K* im Anker, Ankerstrom und Ankerdrahtzahl einer Phase. Bei einer Klemmenspannung von 5500 Volt verkettet und 275 *K V A*, ferner bei $\cos \varphi = 0{\cdot}8$, erhalten wir bei Ausführung der Wicklung in Sternschaltung den Strom einer Phase zu:

$$i = \frac{275000}{5500 \cdot \sqrt{3} \cdot 0{\cdot}8} = \mathbf{29\ Ampères.}$$

Wir können bei Generatoren von 100 bis 500 Kilowatt Leistung 1·5—3% Arbeitsverlust im Ständerkupfer rechnen. Rechnen wir vorläufig 2% Arbeitsverlust von der Nutzleistung und lassen einstweilen auch unberücksichtigt, daß Strom und Spannung nicht in Phase sind, so erhalten wir für die *E M K* in einer Phase:

$$\mathbf{E\ M\ K}\ \text{einer Phase} = \frac{5500 \times 1{\cdot}02}{\sqrt{3}} \cong \mathbf{3260\ Volt.}$$

Die wirksame Drahtzahl Z pro Phase ergibt sich dann aus:

$$Z = \frac{E\ M\ K\ \text{einer Phase} \times 10^8}{k \cdot \infty\ N_2 \times 3{\cdot}5 \times 10^6}\ \text{(S. 133).}$$

Darin bedeutet:
$\sim$ = sekundliche Periodenzahl,
$N_2 \times 10^6$ = Feld für einen Ständerpol,

k = Konstante, abhängig vom Verhältnis $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}}$, von der Zahl der Nuten für einen Pol und Phase und der Art der Wicklung. Wir haben lange Spulen und $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}}$ etwa 0·7. Da man bei der hohen Spannung bei großer Nutenzahl ziemlich viel durch Isolation an wirksamen Eisenquerschnitt verlieren würde, entscheiden wir uns für zwei Nuten, für einen Pol und Phase. k ergibt sich dann zu 2·26.

Wir erhalten daher für die wirksame Drahtzahl Z für eine Phase:

$$Z = \frac{3260 \times 10^8}{2{\cdot}26 \times 40 \times 3{\cdot}5 \times 10^6} = 1040.$$

Da wir für einen Pol und Phase nur zwei Nuten rechnen, erhalten wir $2 \times 32 = 64$ Nuten für eine Phase oder $\frac{1040}{64} = 16{\cdot}3$ Drähte für eine Nut.

Wir entscheiden uns für 17 Drähte in einer Nut und erhalten Z zu

$$\boldsymbol{Z} = 17 \times 64 = \mathbf{1088} \text{ Drähte in einer Phase.}$$

Bei 29 Ampères Phasenstrom und etwa 3 Ampères Stromdichte wählen wir einen Drahtquerschnitt von $q_a = \mathbf{10{\cdot}17}\ mm^2$.

Der blanke Drahtdurchmesser wird: $d_a = 3{\cdot}6\ mm$.

Der isolierte Drahtdurchmesser wird: $d_a' = 4{\cdot}35\ mm$ und ist wegen der hohen Spannung dreifach umsponnen.

Die gesamte Nutenzahl beträgt $3 \times 64 = 192$.

Am Durchmesser D_2 ergibt sich daher eine Nutenteilung von:

$$\boldsymbol{t\ min} = \frac{\pi \times 3200}{192} = \mathbf{52{\cdot}2}\ mm.$$

Legen wir in Fig. 129 drei Drähte nebeneinander und sechs Drähte übereinander, so folgt als Nutenbreite:

$$\boldsymbol{b_n} = 3 \times 4{\cdot}35 + \underset{\text{Isolation}}{6{\cdot}95} = \mathbf{20}\ mm;$$

die Nutentiefe:

$$\boldsymbol{b_t} = 6 \times 4{\cdot}35 + \underset{\text{Isolation}}{7} + \underset{\text{Keil}}{5{\cdot}9} = \mathbf{39}\ mm.$$

Die mittlere Länge eines Drahtes, Fig. 130, ergibt sich ungefähr zu $l_m = 0{\cdot}69\ m$.

Die gesamte Drahtlänge ist:

$$\boldsymbol{L_a} = 3 \times 1088 \times 0{\cdot}69 \cong \mathbf{2260}\ m.$$

Der Widerstand einer Phase: $\rho = \frac{1}{3} \times \frac{2260}{50 \times 10{\cdot}17} = \mathbf{1{\cdot}47}$ Ohm.

Der Spannungsverlust einer Phase $\varepsilon = 29 \times 1{\cdot}47 = 42{\cdot}5$ Volt.
Daher die genaue *E M K* bei $\cos\varphi = 0{\cdot}8$:

$$E\,M\,K \text{ einer Phase} = \sqrt{\left(\frac{5500}{\sqrt{3}}\right)^2 + 42{\cdot}5^2 + 2 \times 42{\cdot}5 \times \frac{5500}{\sqrt{3}} \times 0{\cdot}8}$$

= **3230 Volt** (§ 85, Rubrik III und IV).

Die verkettete *E M K* beträgt daher: $3230\sqrt{3} = 5580$ Volt.
Die genaue Kraftlinienzahl $N_2 \times (10^6)$:

$$N_2 \times (10^6) = \frac{3200 \times 10^8}{1{\cdot}12 \times 80 \times 1088} = \mathbf{3{\cdot}30 \times 10^6}.$$

Die Arbeit im Ankerkupfer (Verlust):

$$3 \times \overline{29}^2 \times 1{\cdot}47 \cong 3700 \text{ Watt}$$

oder $1{\cdot}55\%$ der Nutzleistung.

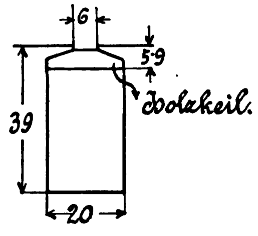


Fig. 129. Nut.

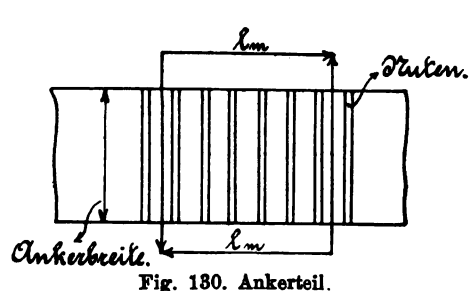


Fig. 130. Ankerteil.

76. Größenverhältnisse der Ständerzähne und des Ständerkerns.

Kleinste Zahnteilung $t\,min = \frac{\pi \times 3200}{192} = \mathbf{52{\cdot}2}\ mm.$

Größte Zahnteilung $t\,max = \pi\left(\frac{3200 + 2 \times 39}{192}\right) = \mathbf{53{\cdot}5}\ mm.$

Kleinste Zahnbreite $\beta\,min = t\,min$ — Nutenbreite $= \mathbf{32{\cdot}2}\ mm.$
Größte Zahnbreite $\beta\,max = \mathbf{33{\cdot}5}\ mm.$
Zahngewicht $G_z = \mathbf{360}\ kg.$ (Spezifisches Gewicht 7·7.)

Lassen wir eine Kernsättigung von $B_k = 6{\cdot}0 \times 10^3$ zu, so erhalten wir einen Kernquerschnitt:

$$q_k = \frac{N_2 \times 10^6}{B_k} = \frac{3{\cdot}28 \times 10^6}{6{\cdot}0 \times 10^3} \text{ rund } \mathbf{600}\ cm^2.$$

$$q_k = [D_1 - (D_2 + 2\,b_t)] \times B_w,$$

worin B_w = wirksame Ankerbreite. Mit Bezug auf Fig. 131 ist:

$$D_1 = \frac{q_k}{B_w} + D_2 + 2\,b_t = \frac{60000}{190} + 3200 + 2 \times 39 \cong \mathbf{3600}\ mm.$$

Kerngewicht des Ständers $G_k = \mathbf{2600}\ kg.$

Nach einer „Faustregel“ bewegt sich die Anzahl der Ampèredrähte für 1 *cm* Ankerumfang zwischen 70 und 100.

Für den vorliegenden Generator erhalten wir:

$$\text{Ampèredrähte für 1 } cm \text{ Umfang } (D_2\,!) = \frac{29 \times 3 \times 1088}{\pi \times 320} = 94.$$

77. Luftspalt und Schlitzbreite der Nut. Um nicht bei Belastungsschwankungen zu große Spannungsschwankungen zu erhalten, muß außer der hohen Schenkelinduktion auch berücksichtigt werden, daß das Verhältnis der $\frac{\text{Ampèrewindungen des Ankers (Ständers)}}{\text{Ampèrewindungen des Polrades für Leerlauf}}$ für ein Polpaar nicht zu groß wird.

Da $\cos\varphi = 0{\cdot}8$ ist, wählen wir dieses Verhältnis, das wir $\frac{A\,W_2}{A\,W_0}$ nennen wollen, zu: $\frac{A\,W_2}{A\,W_0} = 0{\cdot}25.$

$A\,W_2$ ergibt sich für Dreiphasenstrom zu: $A\,W_2 = i\,.\,\frac{3}{2}\,.\,\sqrt{2}\,.\,\frac{z}{2}$, worin i = Strom in einer Phase. Diese Formel gilt genau, wenn die

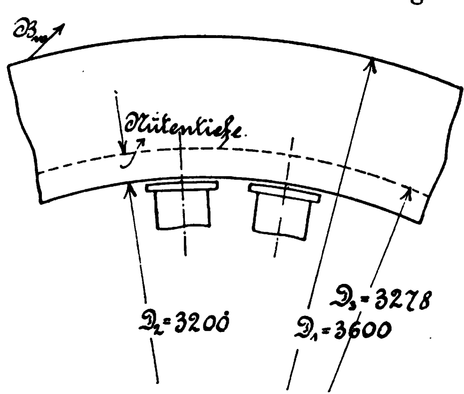


Fig. 131. Ständerzähne und Ständerkern.

Spulenebenen 120° räumlich untereinander einschließen, die Spulenbreite in radialer Richtung keine Ausdehnung besitzt und der zeitliche Stromverlauf nach einer Sinuslinie erfolgt. Die Formel gilt also nur für eine ideale, zweipolige Dreiphasenwicklung [1]) und ist bei dieser $A\,W_2$ für jeden Augenblick konstant. Bei mehrpoligen Maschinen pulsiert $A\,W_2$ zwischen den Werten $2\,.\,c$ und $\sqrt{3}\,.\,c$, streng genommen erst bei Maschinen mit ∞ vielen Polen. Aus Kurzschlußproben [2]) wurde gefunden, daß man $A\,W_2$ für ein Polpaar setzen kann:

---

[1]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, Heft 29.

[2]) Vergleiche Richard Bauch: Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, Seite 378 (Tabelle 15. $A\,W$ berechnet / $A\,W$ gemessen = 0·8186 im Mittel).

$$\boldsymbol{A\ W_2 = \frac{3}{2}\sqrt{2}\,.\,i\,.\,\frac{z}{2p}\,.\,\frac{1}{0{\cdot}8} = \frac{2{\cdot}12 \times 29 \times 1088}{32 \times 0{\cdot}8} = 2{\cdot}6 \times 10^3},$$

worin $i =$ Strom einer Phase. Die Zahl 0·8 wurde aus Proben entnommen.

Für $\frac{A\ W_2}{A\ W_0} = 0{\cdot}25$ erhält man:

$$\boldsymbol{A\ W_0 = \frac{A\ W_2}{0{\cdot}25} = 10{\cdot}4 \times 10^3}.$$

Bei der Bestimmung des Luftspaltes ist große Genauigkeit nicht nötig. Daher werden die Eisenwiderstände vernachlässigt, und als Luftsättigung wird eingesetzt N_2. (Um die Eisenwiderstände einigermaßen zu berücksichtigen, nehmen wir N_2 statt $3{\cdot}28 \times 10^6$ mit $3{\cdot}5 \times 10^6$ an.) Fläche des Polschuhes $[= (B\ tot])^2$.

Im Verlauf der weiteren Berechnung wird dann genauer gerechnet.

Die Luftsättigung B_l ergibt sich zu:

$$B_l = \frac{N_2}{(B\ tot)^2} = \frac{3{\cdot}50 \times 10^6}{(23)^2} \cong 6{\cdot}7 \times 10^3.$$

Da, wenn der magnetische Eisenwiderstand vernachlässigt wird: $A\ W_0 = 0{\cdot}8\ B_l \times 2\ \vartheta$ ist, ergibt sich der Luftspalt ϑ (einseitig!) zu:

$$\vartheta = \frac{A\ W_0}{1{\cdot}6\ B_l} = \frac{10{\cdot}4 \times 10^3}{1{\cdot}6 \times 6{\cdot}7 \times 10^3} = 0{\cdot}97\ cm, \text{ rund } \mathbf{10}\ mm.$$

Dementsprechend wird eine Schlitzbreite der Nut von **6** *mm* gewählt, die klein genug ist, um die Entstehung übermäßig großer Wirbelströme in den Polschuhen zu verhindern.

78. Jochabmessungen, Fig. 132. Das Joch wird ebenfalls aus Stahlguß (wie die Pole) hergestellt und beträgt die Jochsättigung:

$$B_j = 10 \times 10^3.$$

Wir erhalten daher einen Jochquerschnitt:

$$q_j = \frac{N_2'}{B_j} = \frac{3{\cdot}30}{0{\cdot}85} \cdot \frac{1}{10 \times 10^3} \text{ rund } 400\ cm^2,$$

worin für die Streuung 0·85 eingesetzt wurde.

Die Jochstärke ergibt sich daraus, wenn die Jochbreite zu 23 *cm* angenommen wird (wie die Ankerbreite *B tot*), zu: $\frac{400\ cm^2}{23\ cm} \cong 18\ cm$, beziehungsweise **2 × 90** *mm*.

Die Magnetpole sollen kurz angenommen werden und wird ihre Länge mit 130 *mm* festgelegt. Damit sind die Abmessungen bestimmt.

79. Genaue Größe des Polbogens. Es ist eigentlich nicht nötig, dieselbe auszurechnen, da die genaue Größe des Polbogens wenig von

230 *mm* abweichen wird, was eine Folge der großen Polzahl ist. Um die Figur 133 deutlich zu erhalten, sind die Maßverhältnisse gänzlich abnormal angenommen worden.

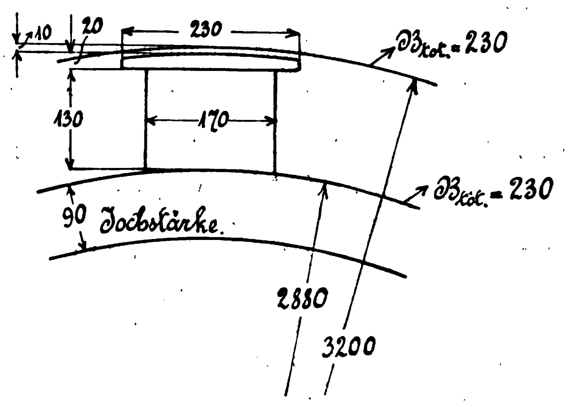


Fig. 132. Jochabmessungen.

$$sin\ \alpha = \frac{230}{2} . \frac{3180}{2} = 0{\cdot}0723.$$

$$\alpha = 4^0\ 8' = 4{\cdot}13^0.$$

$$2\ \alpha = 8{\cdot}26^0.$$

$$\text{Polbogen} = 3180 . \pi . \frac{8{\cdot}26^0}{360^0} = \mathbf{231}\ mm.$$

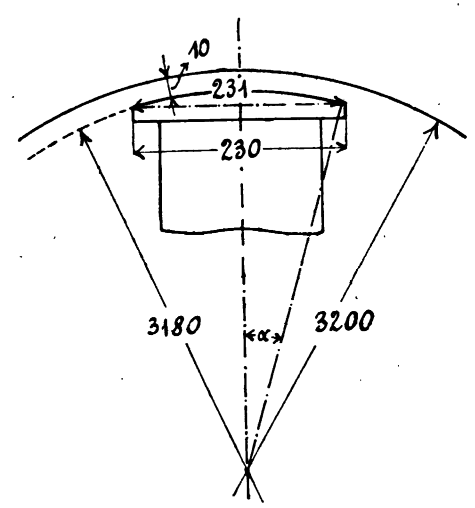


Fig. 133. Polbogen.

Infolge der Erhöhung der früher gefundenen Größe für denselben (§ 71) von 220 *mm* auf 231 *mm* wird das Verhältnis:

$$\frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}} = \frac{231}{\frac{3180 \times \pi}{32}} = 0{\cdot}74.$$

Der Koeffizient C in der Spannungsformel wird praktisch dadurch wenig geändert und bleiben alle bisher gefundenen Angaben beibehalten.

80. Wirksame Eisen- und Luftquerschnitte, die Kraftlinien leiten.

1. Zähne. Zahl der Zähne unter einem Polschuh:

$$\underbrace{192}_{\text{Gesamtzahl}} \times \left(\frac{231}{3200 \,.\, \pi}\right) = 4{\cdot}4.$$

Da die beiden Kreise a und b wegen der kleinen Differenz der Durchmesser fast parallel verlaufen (in Bezug auf die Geraden c und d), kann unmittelbar der eingeklammerte Wert zur Berechnung der Zahnzahl für einen Pol(schuh) benützt werden. Infolge der „nützlichen" Streuung ist die gefundene Zahl um etwa 10% zu vergrößern, so daß $4{\cdot}4 \times 1{\cdot}1 = 4{\cdot}85$ Zähne für einen Pol in Betracht kommen. Daher: Kleinster Zahnquerschnitt am Zahnkopf in cm^2 = $4{\cdot}85 \times$ Kleinste Zahnbreite $\times$ Wirksame Ankerbreite =

$$= q_z\, min = 4{\cdot}85 \times 3{\cdot}22\, cm \times 19\, cm = \mathbf{296}\, cm^2.$$

Ähnlich: Größter Zahnquerschnitt am Zahnfuß:

$$q_z\, max = 4{\cdot}85 \times 3{\cdot}35 \times 19 = \mathbf{310}\, cm^2.$$

2. Ankerkern des Ständers, Fig. 131:

$$q_k = (D_1\, cm - D_2\, cm) \times \text{wirksame}$$

$$\text{Ankerbreite} = (360{\cdot}0 - 327{\cdot}8) \times 19 = \mathbf{613}\, cm^2.$$

(Vergleiche 70.)

3. Luftquerschnitt, Fig. 134. Es ist in die Rechnung ein mittlerer Luftquerschnitt einzusetzen, welcher der strichlierten Linie $\times$ der totalen Ankerbreite entspricht. Wir erhalten daher für

$$q_l = \text{Polbogen}$$

$$\times \frac{[(\text{Kleinste Zahnteilung} - \text{Schlitzbreite}) + \text{Kleinste Zahnteilung}] \times B\,tot}{2 \times \text{Kleinste Zahnteilung}}$$

$$= 23{\cdot}1\, cm\, \frac{[2 \times 5{\cdot}22 - 0{\cdot}6]}{5{\cdot}22 \times 2} \times 23\, cm = 500\, cm^2,$$

worin $\frac{2 \times 5{\cdot}22 - 0{\cdot}6}{5{\cdot}22 \times 2}$ eine unbenannte Verhältniszahl ist.

Infolge der nützlichen Streuung wird q_l etwa 10% größer, also:

$$q_l = \mathbf{550}\, cm^2.$$

Vernachlässigt wurde dabei, die Querschnittverminderung, welche die zwei Ventilationsspalten a und b, Fig. 135, durch ähnliche wie oben dargestellte Kraftlinienverteilung in der Richtung der Breite des Generators hervorrufen.

4. Polquerschnitt: Nach (§ 73) ist $q_s = \mathbf{226}\ cm^2$.

5. Jochquerschnitt: Nach (§ 78) wird:

$$q_j = 2 \times 9 \times B\,tot = 18 \times 23 = \mathbf{414}\ cm^2$$

(infolge Abrundung auf 9 *cm* nicht genau 400 cm^2).

81. Die magnetischen Weglängen.

1. Zähne: $l_z = 2 \times 3{\cdot}9 = 7{\cdot}8\ cm$;
2. Kern: $l_k = 25\ cm$ (nach Zeichnung);
3. Luft: $l_l = 2 \times 1{\cdot}0 = 2\ cm$;
4. Pol und Polschuh: $2 \times (13\ cm + 2\ cm) = 30\ cm = l_s$;
5. Joch: $l_j = 20\ cm$ (nach Zeichnung).

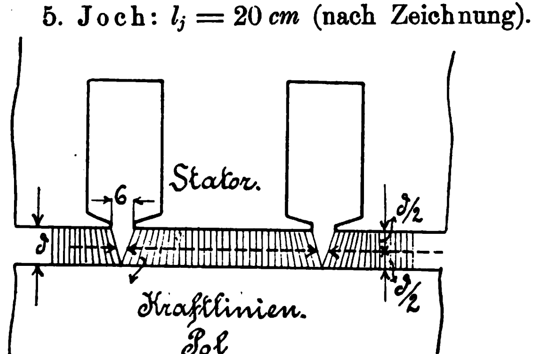


Fig. 134. Luftquerschnitt.

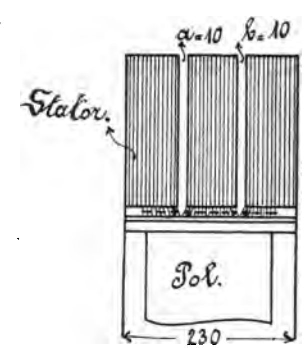


Fig. 135. Polquerschnitt.

82. Bestimmung der Ampèrewindungen.

Die Ampèrewindungen werden zur betreffenden Induktion aufgesucht und mit der magnetischen Weglänge multipliziert. Da sich der maximale Zahnquerschnitt (310 cm^2) und der minimale (296 cm^2) nur wenig voneinander unterscheiden, rechnen wir für die Zähne mit einem Querschnitt von 300 cm^2. Bei großen Unterschieden dieser beiden Zahnquerschnitte ist der Integralwert aller Ampèrewindungen zu bilden, welche den verschieden großen Induktionen längs des ganzen Zahnweges entsprechen.

Die gerechneten Werte sind in der Zusammenstellung (§ 88) enthalten.

Fig. 140 zeigt die Spannungslinie und die Bestimmung der Ampèrewindungen, die auf die Pole aufzuwickeln sind.

83. Rotierende Wicklung, Fig. 136.

$$282 - 174 = 108$$

$$108 - 20 = 88$$

$$a = 44\ mm;\ b = 130\ mm\ \ (\S\ 78)$$

$$130 - 4 = 126\ mm$$

4 *mm* = doppelte Bordscheibendicke.

$D = 2880$ (nach Fig. 132).

Die mittlere Länge einer Windung erhalten wir zu:

$$l_n = \frac{(174 + 44)}{1000} \times \pi = 0{\cdot}685 \ m.$$

Bezeichnen wir mit:

$A\,W_1$ = die aufzuwickelnden Ampèrewindungen pro Polpaar,
ξ = die Windungen pro Spule,
e = die Spannung pro Polpaar,
l_n = die mittlere Länge einer Windung am Schenkel,
q_n = Drahtquerschnitt der Wicklung,
$k = 50$, die Leitungsfähigkeit des Kupfers im warmen Zustande,

so ist:

$A\,W_1 = 2\,\xi\,i;$ $\qquad$ i = den Strom in der Wicklung,

$i = \frac{e}{r};$ $\qquad$ r = den Widerstand von $2\,\xi$ Windungen,

$$r = \frac{2\,\xi\,l_n}{q_n \times 50};$$

$$i = \frac{e}{r} = \frac{e \,.\, 50 \,.\, q_n}{2\,\xi \,.\, l_n}$$

$$A\,W_1 = 2\,\xi \,.\, i = \frac{e \,.\, q_n \,.\, 50}{l_n} \quad \text{oder} \quad q_n = \frac{l_n \,.\, A\,W_1}{e \times 50}.$$

Wir entnehmen aus Fig. 140: $A\,W_1 = 13{\cdot}7 \times 10^3$ ($= O\,B$).

Als Erregerspannung nehmen wir 35 Volt, daher $e = \frac{35}{16} = 2{\cdot}18$ Volt.

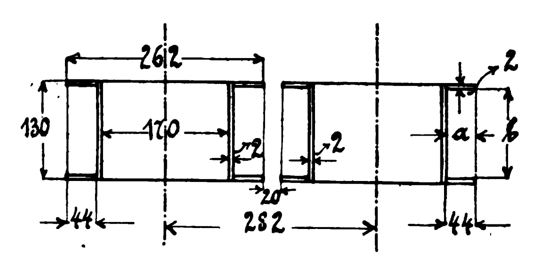


Fig. 136. Magnetkranz-Spulen.

Wir erhalten:

$$q_n = \frac{l_n \,.\, A\,W_1}{e \times 50} = \frac{0{\cdot}685 \times 13{\cdot}7 \times 10^3}{2{\cdot}18 \times 50} = 86 \ mm^2.$$

Es werden Kupferbänder von 2 *mm* × 43 *mm* gewählt, die auf einer Vorrichtung aufgewunden werden und bei der Montage über die Pole als Ganzes aufzuschieben sind. Die Wicklung besteht aus blankem Kupfer und werden die einzelnen Windungen voneinander durch Papier isoliert, was bei der geringen Erregerspannung durchführbar ist.

$\xi = (a : 43) \times (0{\cdot}9\, b : 2) = 56$ Windungen in einer Spule, Fig. 137.
a und b (nach § 83) $0{\cdot}9\, b$ bedeutet die Wickelhöhe abzüglich der Papierisolation.

$2\,\xi = 112$ Windungen; $i = \frac{A\,W_1}{2\,\xi} = \frac{13700}{112} = 122$ Ampère Erregerstrom.

Gesamte Länge des Erregerkupfers:

$$L_n = 2\,\xi\,.\,p\,.\,l_n = 112 \times 16 \times 0{\cdot}685 = 1230\ m;$$

Gesamtwiderstand $R = \frac{L_n}{50\,.\,q_n} = \frac{1230}{50 \times 86} = 0{\cdot}286$ Ohm.

Gesamtwatt für Erregung:

$$W = i^2\,.\,R = \overline{122}^2 \times 0{\cdot}286 \cong 4300 \text{ Watt};$$

Watt in einer Spule: $\frac{4300}{32} = 135.$

Die der Abkühlung ausgesetzte Oberfläche einer Spule berechnen wir als Zylindermantel, Fig. 138, und erhalten (nach § 83) für dieselbe:

$$O = 2{\cdot}62 \times \pi \times 1{\cdot}3 = \mathbf{10{\cdot}7}\ dm^2.$$

Daher: **Watt für einen** $dm^2 = \frac{135}{10{\cdot}7} = \mathbf{12{\cdot}6}.$

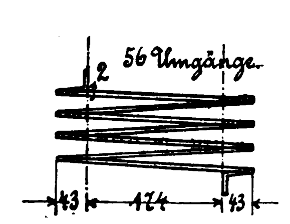


Fig. 137.
Wicklung der Magnetkranz-Spulen.

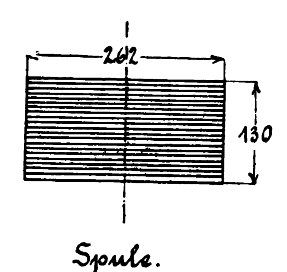


Fig. 138.
Oberfläche einer Spule.

Bei ruhenden Spulen entspricht dieser Wert von 12·6 Watt für 1 dm^2 einer Temperaturzunahme (über die Außentemperatur) von 35° C., die allgemein zugelassen wird. Da das Magnetrad jedoch eine Umfangsgeschwindigkeit von etwa 25 m hat, wird infolge der Ventilation diese Temperaturzunahme nicht erreicht werden und die Wicklung wird sich nur unwesentlich erwärmen.

84. Verluste im Ständer.

1. Kupferverluste.

Dieselben betragen (nach § 75) **3700** Watt.

2. Eisenverluste.

Die folgende Tabelle gibt die Verluste durch Hysteresis für 1 *kg* Eisen bei 100 Perioden an. Die aufgestellten Zahlen sind Mittelwerte zwischen Angaben von Kapp und Niethammer.

Die Wirbelstromverluste werden, da dieselben meist sehr klein sind, vernachlässigt.

$B =$	4×10^3	$5{\cdot}5 \times 10^3$	7×10^3	11×10^3	15×10^3	für 100
Watt pro 1 *kg* =	2·5	5	7·5	15	25	Perioden

$$B_z = \frac{N_2}{300} = \frac{3{\cdot}28 \times 10^6}{300} = 11 \times 10^3;$$

$$\text{Watt pro 1 } kg = \frac{15 \times 40}{100} = 6 \text{ bei } 40 \sim = 80 \text{ Wechsel.}$$

$$B_k = \frac{N_2}{613} = \frac{3{\cdot}28 \times 10^6}{613} = 5{\cdot}35;$$

$$\text{Watt pro 1 } kg = \frac{5 \times 40}{100} = 2 \text{ bei } 40 \sim = 80 \text{ Wechsel.}$$

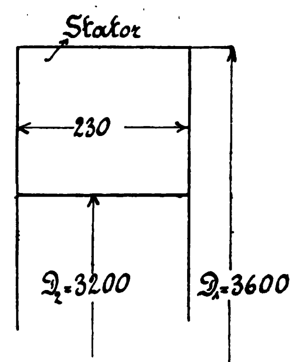


Fig. 139. Skizzen zur Berechnung der Oberfläche des Ständers.

Das Zahngewicht beträgt (nach § 76) 360 *kg*.

Das Kerngewicht beträgt (nach § 76) 2600 *kg*, daher haben wir für die Eisenverluste:

$$2600 \times 2 + 360 \times 6 = \mathbf{7360} \text{ Watt.}$$

Sind die Zähne stark konisch, so ist zur Bestimmung der Eisenverluste ein besonderes Verfahren[1]) anzuwenden.

Die **Gesamtwatt im Ständer** betragen daher:

$$3400 + 7360 = \mathbf{10760} \text{ Watt.}$$

Wir berechnen als der Abkühlung ausgesetzt eine Oberfläche, welche durch Rotation des schraffierten Linienzuges um den Punkt *m*, Fig. 139, entsteht und erhalten:

$$O = \frac{\pi}{4}\,(36^2 - 32^2) \times 2 + 2{\cdot}3 \times \pi \times (36 + 32) = 960 \; dm^2.$$

daher Watt pro 1 $dm^2 = \frac{10760}{960} = \mathbf{11{\cdot}3}$, d. h. die Erwärmungszunahme des Ständers wird nach den (in § 83) gegebenen Erläuterungen 35° C. nicht erreichen.

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1897, S. 80.

85. Zusammenstellung der Resultate.

Zwischen III und IV: Werte, die 275 *K V A* und 5500 Volt Klemmenspannung entsprechen.

	I.	II.	III.	IV.	V.
Verkettete *EMK*:	1690 Volt	3050 Volt	4230 Volt	6000 Volt	7500 Volt
EMK für eine Phase:	980 "	1765 "	2445 "	3460 "	4440 "
$N_2 \times 10^6$ (für Luft und Ständer):	$1{\cdot}01 \times 10^6$	$1{\cdot}81 \times 10^6$	$2{\cdot}51 \times 10^6$	$3{\cdot}53 \times 10^6$	$4{\cdot}55 \times 10^6$
$N'_2 \times 10^6 = \dfrac{N_2 \times 10^6}{0{\cdot}85}$ (für Joch und Pole):	$1{\cdot}19 \times 10^6$	$2{\cdot}13 \times 10^6$	$2{\cdot}96 \times 10^6$	$4{\cdot}15 \times 10^6$	$5{\cdot}35 \times 10^6$
Sättigungen:					
$B_z \times 10^3 = \dfrac{N_2}{q_z}$:	$3{\cdot}38 \times 10^3$ (2·0)	$6{\cdot}03 \times 10^3$ (2·5)	$8{\cdot}4 \times 10^3$ (2·8)	$11{\cdot}8 \times 10^3$ (4·3)	$15{\cdot}2 \times 10^3$ (11·0)
$B_k \times 10^3 = \dfrac{N_2}{q_k}$:	$1{\cdot}65 \times 10^3$ (1·5)	$2\ 96 \times 10^3$ (1·9)	$4{\cdot}1 \times 10^3$ (2·2)	$5{\cdot}75 + 10^3$ (2·4)	$7{\cdot}43 \times 10^3$ (2·7)
$B_l \times 10^3 = \dfrac{N_2}{q_l}$:	$1{\cdot}84 \times 10^3$ ($1{\cdot}475 \times 10^3$)	$3{\cdot}3 \times 10^3$ ($2{\cdot}64 \times 10^3$)	$4{\cdot}56 \times 10^3$ ($3{\cdot}66 \times 10^3$)	$6{\cdot}41 \times 10^3$ ($5{\cdot}13 \times 10^3$)	$8{\cdot}3 \times 10^3$ ($6{\cdot}64 \times 10^3$)
$B_s \times 10^3 = \dfrac{N'_2}{q_s}$: } Stahl	$5{\cdot}28 \times 10^3$ (1·2)	$9{\cdot}42 \times 10^3$ (3·2)	$13{\cdot}1 \times 10^3$ (9·0)	$18{\cdot}4 \times 10^3$ (13·0)	$23{\cdot}7 \times 10^3$ (442·0)
$B_j \times 10^3 = \dfrac{N'_2}{q_j}$: } Stahl	$2{\cdot}88 \times 10^3$ (0·8)	$5{\cdot}15 \times 10^3$ (1·3)	$7{\cdot}15 \times 10^3$ (2·0)	10×10^3 (3·8)	$12{\cdot}9 \times 10^3$ (8·0)

Die unter den Sättigungen eingeschriebenen, eingeklammerten Werte, bedeuten die zugehörigen Ampèrewindungen pro 1 *cm* Weglänge.

Ampèrewindungen für:	I.	II.	III.	IV.	V.
Zähne: $7{\cdot}8 \times A\ W\,cm$	$0{\cdot}0156 \times 10^3$	$0{\cdot}0195 \times 10^3$	$0{\cdot}0218 \times 10^3$	$0{\cdot}0336 \times 10^3$	$0{\cdot}086 \times 10^3$
Kern: $25 \times A\ W\,cm$	$0{\cdot}0375 \times 10^3$	$0{\cdot}0475 \times 10^3$	$0{\cdot}055 \times 10^3$	$0{\cdot}06 \times 10^3$	$0{\cdot}0675 \times 10^3$
Luft: $2 \times A\ W\,cm$	$2{\cdot}95 \times 10^3$	$5{\cdot}28 \times 10^3$	$7{\cdot}32 \times 10^3$	$10{\cdot}26 \times 10^3$	$13{\cdot}28 \times 10^3$
Schenkel: $30 \times A\ W\,cm$	$0{\cdot}036 \times 10^3$	$0{\cdot}096 \times 10^3$	$0{\cdot}27 \times 10^3$	$3{\cdot}9 \times 10^3$	$13{\cdot}26 \times 10^3$
Joch: $20 \times A\ W\,cm$	$0{\cdot}016 \times 10^3$	$0{\cdot}026 \times 10^3$	$0{\cdot}04 \times 10^3$	$0{\cdot}078 \times 10^3$	$0{\cdot}16 \times 10^3$
Σ der Ampèrewindungen für oben angenommene Leerlaufsspannungen.	$3{\cdot}06 \times 10^3$	$5{\cdot}47 \times 10^3$	$7{\cdot}71 \times 10^3$	$14{\cdot}33 \times 10^3$	$26{\cdot}85 \times 10^3$

86. Elektrischer Wirkungsgrad des Generators (ohne Berücksichtigung der Reibung und der Verluste in der Erregermaschine).

+	Gesamtverluste im Ständer:	10760 Watt (84).
	„ „ Magnetrad:	4300 Watt (83).
	Nutzbar abgegebene Leistung:	220000 Watt (69).
	Zugeführte elektrische Energie:	235060 Watt

$$\eta = \frac{220000}{235060} = \mathbf{0{\cdot}935} \text{ bei } \cos\varphi = 0{\cdot}8.$$

87. Die Zusammensetzung der Ampèrewindungen, beziehungsweise die Bestimmung der Gesamtampèrewindungen, Fig. 140, nach den Theorien Rotherts.

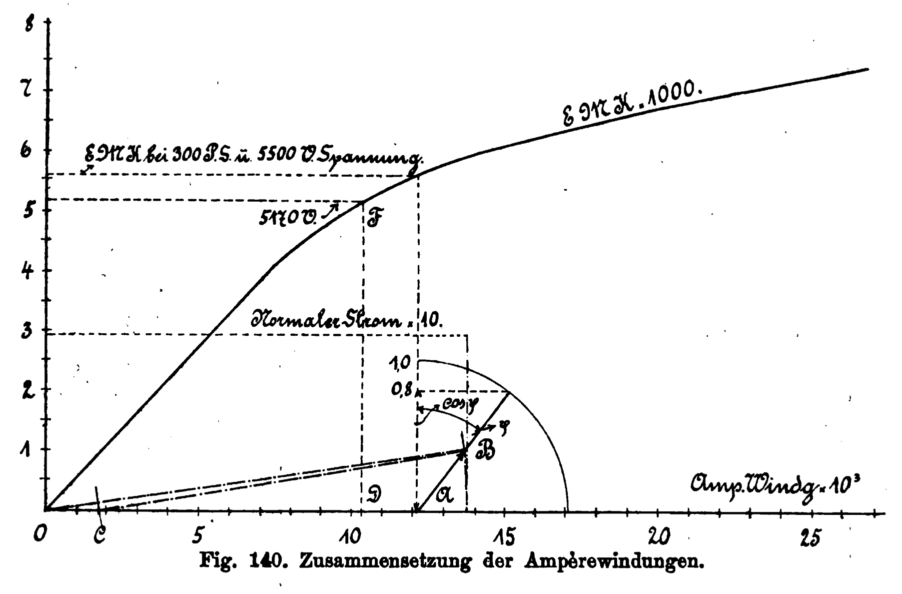


Fig. 140. Zusammensetzung der Ampèrewindungen.

OB = Ampèrewindungen, die zur Erzeugung von 5500 Volt bei 300 PS nötig sind.

OA = Ampèrewindungen zur Erzeugung der Klemmenspannung und Überwindung des Spannungsverlustes.

AB = Ständerampèrewindungen $= 2{\cdot}6 \times 10^3$ (§ 77). Läßt man die Erregung gleich OA und belastet mit dem vollen Strom von 29 Ampère für 1 Phase, so sinkt die Klemmenspannung von 5500 Volt auf 5170 Volt. Man findet diese Spannung, indem man folgende Konstruktion ausführt:

$$BC = AO$$
$$CA = OD$$
$$DF \perp OA.$$

Da wir ε bei Bestimmung dieser Spannung vernachlässigen können, stellt DF die Spannung vor, die bei normalem Strome und den Leerlaufsampèrewindungen OA auftritt; die Spannung sinkt bloß um 6% (zwischen Voll- und Leerlauf und OA konstant) und wurde dieser sehr geringe Betrag deshalb zu erreichen getrachtet, da der Generator für Bahnzwecke bestimmt ist, infolgedessen ohnedies in den Leitungen ein nicht unerheblicher Verlust stattfinden wird. Selbst bei den größten Belastungsschwankungen wird ein Nachregulieren überflüssig werden und man kann ohne Kompoundierung der umlaufenden Wicklung auskommen.

Andere Methoden bezw. Beiträge zu der Berechnung von Wechselstrommaschinen stammen von Behn-Eschenburg, Fischer-Hinnen[1]), Karl Pichlmayer[2]) u. a.

V. Kapitel.

Entnahme von Ein- und Mehrphasenstrom aus einer Gleichstromdynamo.

88. Formel für die elektromotorische Kraft. Wir gehen im folgenden, um unsere Betrachtungen zu vereinfachen, von der Annahme aus, daß das die EMK induzierende Feld homogen und über den ganzen Ankerumfang verteilt sei.

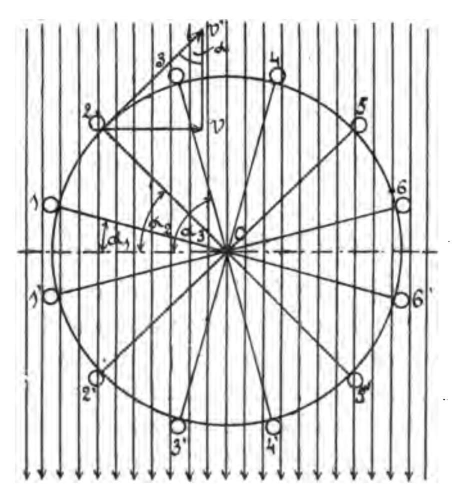


Fig. 141. Anker im homogenen Felde.

In Fig. 141 sei ein Gleichstromanker zur Darstellung gebracht, in dessen Leitern bei der Umdrehung elektromotorische Kräfte indu-

[1]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 157.

[2] Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 908.

ziert werden. Da das Feld homogen ist und wir die Winkelgeschwindigkeit der Drehung konstant voraussetzen, sind die zeitlichen augenblicklichen Werte der in jedem Leiter induzierten elektromotorischen Kräfte proportional dem Sinus des Winkels α.

Denn die induzierte *EMK* ist der Geschwindigkeit $v' \sin \alpha$ proportional, wenn v die Umfangsgeschwindigkeit bedeutet. Wir bringen dieses Ergebnis in dem Vektorendiagramm Fig. 142 zum Ausdruck.

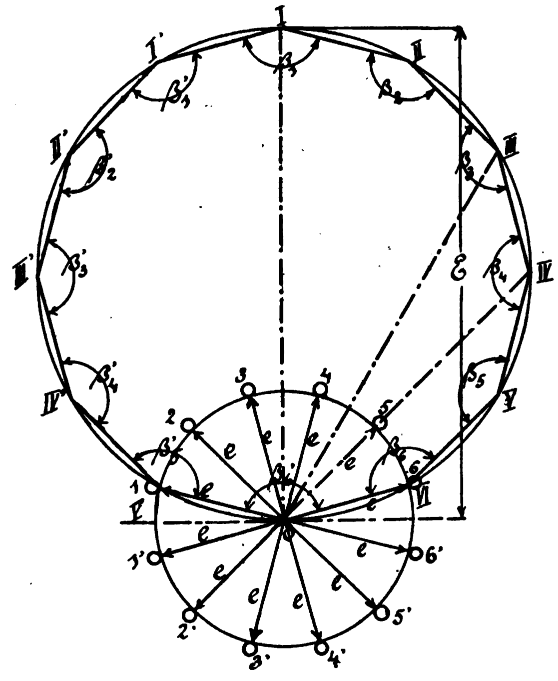


Fig. 142. Veranschaulichung der *EMK* im Anker.

Ist e die Amplitude der in jedem Leiter induzierten *EMK*, die naturgemäß für jeden einzelnen Leiter dieselbe Größe hat, so finden wir die Größe der Amplitude der *EMK* E, die insgesamt induziert wird, wenn wir die vektorielle Summe der Einzel-*EMK* bilden. Führen wir diese geometrische Addition aus, so erhalten wir ein geschlossenes Vieleck von so viel Seiten, als Leiter vorhanden sind. Da alle Seiten dieses Vieleckes gleich lang sind und infolge des gleichen Abstandes aller Leiter voneinander auch alle Winkel β_6, β_5, β_4 u. s. f. gleich groß werden, ist der geometrische Ort der Punkte VI, V, IV u. s. f. ein Kreis. Die Größe E ist der Durchmesser dieses Kreises und entspricht, als Summe der einzelnen Amplituden, der Amplitude der *EMK* aller Leiter. Nehmen wir von der Dynamo Gleichstrom ab, so ist E

gleich der induzierten, konstanten EMK, wie sie den $\frac{z}{2}$ nebeneinander geschalteten Leitern entspricht, wenn z die Anzahl der Ankerleiter am ganzen Umfange ist. Die Sehne O IV wurde nach dem Vorhergehenden den Höchstwert (Amplitude) der EMK vorstellen, den die Leiter 6 — 5 — 4, Fig. 142, erzeugen, die Sehne O III wäre dagegen die Amplitude der EMK, die von den Leitern 6 — 5 — 4 — 3 hervorgebracht wird.

Ganz allgemein können wir daher sagen:

Zeichnen wir einen Kreis, dessen Durchmesser gleich der Spannung ist, welche eine Gleichstrommaschine liefert, und ziehen wir in diesem Kreise eine beliebige Sehne, so gibt die Größe derselben die Amplitude der Wechselstromspannung an, die wir messen würden, wenn an die den beiden Endpunkten der Sehne entsprechenden Ankerleiter ein Spannungszeiger angelegt werden würde. Um den Fall rechnerisch zu behandeln, zeichnen wir in Fig. 143 einen Kreis, dessen

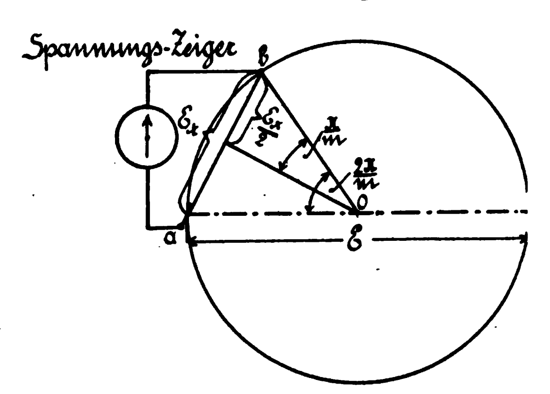


Fig. 143. Spannung im Anker.

Durchmesser gleich der Spannung ist, die eine Gleichstrommaschine liefern würde. Diese Spannung sei E. Wir denken uns nun an den Punkten a und b einen Spannungszeiger angelegt. Am Kreisumfange seien die Ankerleiter angebracht und wir würden daher mit dem Spannungszeiger eine Spannung messen, die ungefähr, da der Bogen ab, Fig. 143, etwa $^1/_3$ des halben Umfanges umfaßt, ein Drittel der von $\frac{z}{2}$ Drähten induzierten EMK entspricht. Wie wir schon wissen, gibt die Sehne ab die Größe der Amplitude der gemessenen Spannung an. Da die Punkte a und b bei der weiteren Drehung auch in den unteren Halbkreis gelangen, ist die EMK ein Wechselstrom-EMK.

Nennen wir den Kreisumfang vom Radius 1 gleich 2π (entsprechend 360°) und ist der Bogen $ab = \frac{1}{m}$ des Umfanges, so ist der Zentriwinkel gleich $\frac{2\pi}{m}$. Die Sehne ab erhalten wir aus Fig. 143 zu:

$$ab = E_x = 2 \,.\, \frac{E}{2} \,.\, sin \frac{\pi}{m}.$$

E_x ist die Amplitude der an den Punkten a und b gemessenen Wechselstrom-*EMK*. Der effektive Wert derselben sei E' und wir finden denselben, wenn wir E_x durch $\sqrt{2}$ dividieren. Wir erhalten also ganz allgemein für die effektive Wechselstrom-*EMK* E' den Ausdruck:

$$E' = \frac{E \,.\, sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}}.$$

m ist dabei die Zahl der Teile, in welche die Wicklung durch die zu den Schleifringen führenden Drähte zerlegt wird, und zwar ist m:
bei Ein- und Zweiphasenstrom $= 2$,
bei Dreiphasenstrom $= 3$,
bei Vierphasenstrom $= 4$ u. s. f.

89. Entnahme von Ein- und Mehrphasenstrom aus einer Gleichstromdynamo. Wollen wir nun eine Gleichstrommaschine, die als solche die Spannung E gibt, als Einphasenmaschine benützen, so gibt dieselbe eine effektive Spannung E' von der Größe:

$$E' = \frac{E \,.\, sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} = \frac{E \,.\, sin \left(\frac{180^0}{2}\right)}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}707\, E.$$

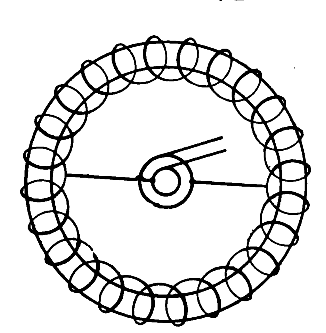


Fig. 144. Abnahme von Wechselstrom aus einem Anker.

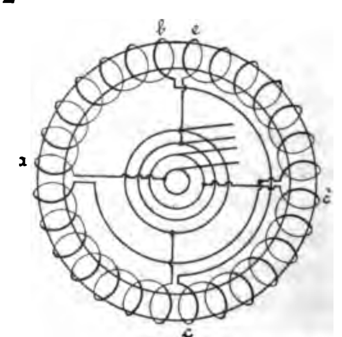


Fig. 145. Abnahme von Zweiphasenstrom aus einem Anker.

Daß m bei Einphasenstrom gleich 2 ist, leuchtet sofort ein, wenn wir uns vergegenwärtigen, daß m die Zahl der Teile vorstellt, in welche

die Wicklung durch die zu den Schleifringen führenden Drähte zerlegt wird. Denken wir uns einen gewöhnlichen Ringanker, so veranschaulicht Fig. 144 die Schaltung, wenn wir denselben zur Entnahme von Wechselstrom heranziehen (Fig. 5 und 6).

Nach der allgemeinen Formel $E' = \frac{E \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}}$ erhalten wir für Dreiphasenstrom:

$$E' = \frac{E \cdot \sin\left(\frac{180^0}{3}\right)}{\sqrt{2}} = \frac{E \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}612\, E \text{ und}$$

für Vierphasenstrom:

$$E' = \frac{E \cdot \sin\left(\frac{180^0}{4}\right)}{\sqrt{2}} = \frac{E \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}5 \cdot E.$$

Wie Fig. 145 zeigt, ist diese Formel auf Zweiphasenstrom nicht ohneweiters anwendbar (Fig. 7). In unseren bisherigen Ableitungen hatten wir nur immer eine Kreissehne, welche die Amplitude der Wechselstrom- beziehungsweise Mehrphasenstromspannung darstellte. Bei Entnahme von Zweiphasenstrom ist jedoch der Anker nach Fig. 145 zu schalten und wir erhalten als Maß für die Amplitude der Spannung die Summe der beiden Sehnen $ab + cd$. Die beiden, diesen Sehnen entsprechenden Spannungen sind, da sie sich infolge ihrer Richtung und Schaltung algebraisch addieren und daher eine resultierende Spannung ergeben, die doppelt so groß ausfällt als die, welche $\frac{1}{4}$ des Umfanges entsprechen würde, die doppelte Spannung derjenigen, die bei Vierphasenstrom auftritt. Wir erhalten daher für Zweiphasenstrom:

$$E' = \frac{2 \cdot E \cdot \sin\left(\frac{180^0}{4}\right)}{\sqrt{2}} = \frac{2\, E \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = E.$$

Wir wenden uns nunmehr der Berechnung der Stromverhältnisse zu. Zunächst interessiert uns der Strom einer Wicklungsabteilung, d. h. eines Wickelelementes m.

Soll die Gleichstrommaschine in ihrer Verwendung als Ein- oder Mehrphasendynamo dieselbe Leistung aufweisen, so finden wir die zu berechnenden Stromgrößen, wenn wir die Leistung, welche die Maschine als Gleichstromdynamo gibt, auch als Leistung für Ein- oder Mehrphasenstrom annehmen.

Liefert die Gleichstrommaschine J Ampères bei E Volt in den äußeren Kreis, so erhalten wir, wenn wir die effektive Stromstärke der Ein- oder Mehrphasenmaschine pro Wickelelement m mit J_x bezeichnen (J_x ist also zugleich auch die Stromstärke einer Phase), ganz allgemein:

$$m \cdot \frac{J_x \cdot E \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} = J \cdot E, \text{ oder:}$$

$$J_x = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{m \cdot \sin \frac{\pi}{m}}.$$

Wir erhalten daher
für Einphasenstrom:

$$J_x = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{m \cdot \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \sin \left(\frac{180^0}{2}\right)} = 0{\cdot}707\ J,$$

für Dreiphasenstrom:

$$J_x = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{m \cdot \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot \sin \left(\frac{180^0}{3}\right)} = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{3 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3}} = 0{\cdot}545 \cdot J,$$

für Vierphasenstrom:

$$J_x = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{m \cdot \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot \sin \left(\frac{180^0}{4}\right)} = \frac{J \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2}} = 0{\cdot}5 \cdot J \text{ u. s. f.}$$

Für Zweiphasenstrom folgt aus der Gleichsetzung von:

$$2\, E' \cdot J_x = E \cdot J$$

$$J_x = 0{\cdot}5 \cdot J.$$

Nach früherem war ja E', die Phasenspannung für Zweiphasenstrom, gleich der Gleichstromspannung, und die Leistung bei der Entnahme von Zweiphasenstrom ist, da $m = 2$ ist, $2\, E' \cdot J_x$.

Um die verketteten Stromwerte zu bilden, haben wir uns zu erinnern, daß dieselben gleich der geometrischen Differenz zweier benachbarter Phasenströme sind.

Denn wir erhalten aus Fig. 146 nach dem Kirchhoffschen Gesetz:

$$J_x = J_x' + J_x, \text{ oder:}$$

$$J_x' = J_x - J_x,$$

geometrisch zusammengesetzt.

Führen wir diese Zusammensetzung in Fig. 147 aus, so erhalten wir aus dem schraffierten Dreieck:

$$\frac{J_x'}{2} = J_x \sin \frac{\pi}{m}, \text{ oder:}$$

$$J_x' = 2\, J_x \,.\, \sin \frac{\pi}{m}.$$

Setzen wir für J_x den früher gefundenen Wert ein, so erhalten wir:

$$J_x' = \frac{2\, J \,.\, \sqrt{2}}{m \,.\, \sin \frac{\pi}{m}} \,.\, \sin \frac{\pi}{m} = \frac{2\, J \,.\, \sqrt{2}}{m}.$$

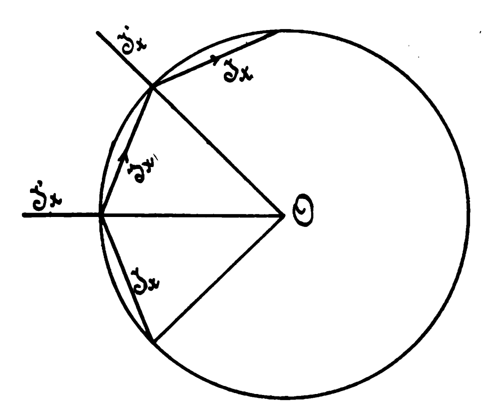


Fig. 146. Zusammensetzung der Ströme.

Fig. 147. Zusammensetzung der Ströme.

Wir finden daher für den verketteten Strom, beziehungsweise für den Strom in der Linie:

$$\text{für Einphasenstrom: } J_x' = \frac{2\, J \,.\, \sqrt{2}}{2} = 1{\cdot}414 \,.\, J,$$

$$\text{für Dreiphasenstrom: } J_x' = \frac{2 \,.\, J \,.\, \sqrt{2}}{3} = 0{\cdot}943\, J,$$

$$\text{für Vierphasenstrom: } J_x' = \frac{2\, J \,.\, \sqrt{2}}{4} = 0{\cdot}707 \,.\, J.$$

Da J_x für Zweiphasenstrom $0{\cdot}5\; J$ ist, erhalten wir aus:

$J_x' = 2\, J_x \,.\, \sin \frac{\pi}{m}$ den Wert J_x' für diese Stromart zu

$$J_x' = 2 \,.\, 0{\cdot}5\, J \,.\, \sin \left(\frac{180^0}{4}\right) = 0{\cdot}707 \,.\, J.$$

In diesem Falle ist $m = 4$ zu setzen, denn, verbinden wir in Fig. 145 die Punkte *a* und *e* der Wicklung, so erhalten wir, wie Fig. 148 zeigt, dasselbe Bild für den verketteten Strom, wie es in Fig. 149 für Vierphasenstrom dargestellt ist.

Unter dem verketteten Strom einer Einphasenmaschine verstehen wir hier den aus beiden Ankerhälften resultierenden. Die Phasenverschiebung dieser beiden Ströme beträgt 180°, da, bei gleicher absoluter Größe beider Ströme, der eine positiv und der andere negativ ist.

Die hier abgeleiteten Werte für die Phasen- beziehungsweise die verketteten Ströme gelten nur so lange, als wir gleiche Leistungen für die Verwendung als Gleichstrom-, Ein- oder Mehrphasenmaschine voraussetzen.

Es sollen nun auch Formeln abgeleitet werden, welche die Abhängigkeit der Leistungen von der Verwendungsart unter der Annahme feststellen, daß die Stromwärme $J^2 \times$ Ankerwiderstand in allen Fällen gleich sei, d. h. unter der Annahme gleicher Beanspruchung des Ankerkupfers.

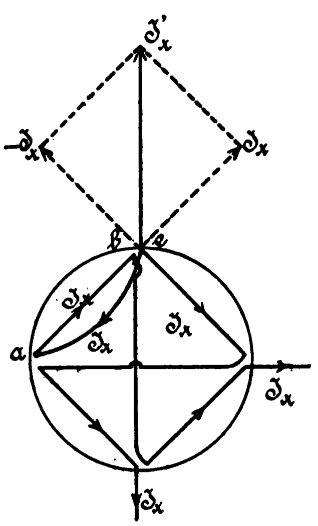
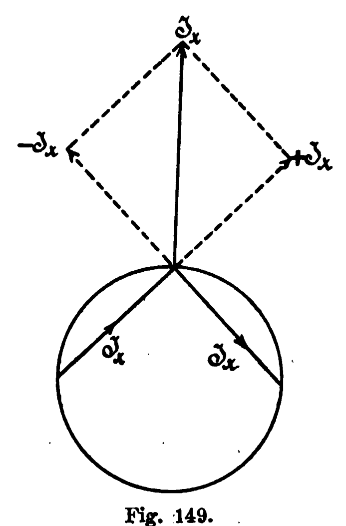



Fig. 148. Verketteter Strom.


Fig. 149. Verketteter Vierphasenstrom.

Hat der Gleichstrom die Stärke J, d. h. in einer Ankerhälfte die Größe $\frac{J}{2}$, so bringt ein Wechselstrom von der gleichen effektiven Stärke in einer Phase dieselbe Ankererwärmung hervor. Die Ströme sind also, um unter Annahme gleicher Ankerkupfererwärmung bei den verschiedenen Verwendungsarten einen Schluß auf die Leistungen ziehen zu können, ebenfalls mit $\frac{J}{2}$ einzusetzen. An der für die Spannungen abgeleiteten Formel wird naturgemäß nichts geändert. Wir erhalten also allgemein:

$$m \cdot \frac{J}{2} \cdot \frac{E \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} : 2 \frac{J}{2} \cdot E = L' : L.$$

L bedeutet dabei die Leistung der Gleichstrommaschine, L' die Leistung der Ein- oder Mehrphasendynamo. Es ergibt sich also:

$$L' = \frac{L \cdot m \cdot \sin \frac{\pi}{m}}{2\sqrt{2}} = L \cdot c.$$

Wir erhalten für c
bei Einphasenstrom:

$$c = \frac{m \cdot \sin \left(\frac{180^0}{2}\right)}{2\sqrt{2}} = \frac{2}{2\sqrt{2}} = 0{\cdot}707,$$

bei Dreiphasenstrom:

$$c = \frac{m \cdot \sin \left(\frac{180^0}{3}\right)}{2\sqrt{2}} = \frac{3 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} = 0{\cdot}918,$$

bei Vierphasenstrom:

$$c = \frac{m \cdot \sin \left(\frac{180^0}{4}\right)}{2\sqrt{2}} = \frac{4 \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2}}{2\sqrt{2}} = 1{\cdot}0.$$

Bei Zweiphasenstrom ist $2 \cdot \frac{J}{2} \cdot E$ die Leistung, die also bei gleicher Stromstärke im Anker gleich der Leistung der Gleichstrommaschine ist. c ist also bei Zweiphasenstrom ebenfalls gleich 1. Die Spannung E ist sowohl bei Gleichstrom als auch bei Zweiphasenstrom von derselben Größe.

Die Phasenströme J_x sind für gleiche Ankerkupferwärme alle gleich $\frac{J}{2}$ und unabhängig von der Phasenzahl. Aus Fig. 147 ging hervor, daß der verkettete J_x' Strom gleich:

$J_x' = 2\, J_x \cdot \sin \frac{\pi}{m}$ war. Setzen wir für $J_x = \frac{J}{2}$ ein, so erhalten wir für die verketteten Ströme J_x', gleiche Ankerkupferwärme in allen Fällen vorausgesetzt:

$$J_x' = 2 \frac{J}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{m} = J \cdot \sin \frac{\pi}{m}.$$

Es folgt daher in diesem Falle für J_x'
bei Einphasenstrom: $J_x' = J \cdot \sin \left(\frac{180^0}{2}\right) = J,$

bei Dreiphasenstrom: $J_x' = J \,.\, sin\left(\frac{180^0}{3}\right) = \frac{1}{2}\sqrt{3}\,.\,J = 0{\cdot}866\,J,$

bei Vierphasenstrom: $J_x' = J \,.\, sin\left(\frac{180^0}{4}\right) = J\,.\,\frac{1}{2}\sqrt{2} = 0{\cdot}707\,J.$

Bei Zweiphasenstrom erhält man, da das Bild für den verketteten Strom (vergl. Fig. 148 und 149) mit dem für Vierphasenstrom vollkommen gleichwertig ist, für J_x' ebenfalls $J_x' = 0{\cdot}707\,J$, wie bei Vierphasenstrom.

VI. Kapitel.

Periodenzahl.

90. Periodenzahl (Frequenz). Zumeist werden in Europa 50 Perioden in der Sekunde = 100 Polwechsel in der Sekunde oder 6000 Polwechsel in der Minute verwendet. Diese Periodenzahl ist für die Parallelschaltung der Wechselstrommaschinen und auch dann erforderlich, wenn Glüh- (auch für Innenräume) und Bogenlampen (im Freien) ruhig brennen sollen. Glühlampen erfordern mindestens 30 Perioden. Bei ganz geringen Wechselzahlen kann man die Wechsel an den Schwankungen des Lichtbogens zählen. Bogenlampen benötigen im Freien 50, im Innern 100 Polwechsel. In Amerika findet man sehr häufig die Periodenzahlen 25, 40 (zumeist) und 60 (für Arbeitsübertragung und Motoren), früher oft 125 Perioden (für Lichtnetze mit Einzeltransformatoren). Ganz & Comp. und Brown, Boveri & Comp. verwenden 40 bis 45 Perioden. Dabei werden die Schwierigkeiten beim Parallelbetrieb, welche hohe Perioden bieten, vermieden. Bei der Niagara-Arbeitsübertragung finden 25 Perioden Verwendung, weil der induktive Leitungsabfall mit dem Quadrate der Periodenzahl abnimmt. Für Beleuchtungszwecke ist dann eine Umformung erforderlich, die Motoren jedoch haben schon bei geringer Polzahl kleine Umdrehungszahlen. Ist die minutliche Umdrehungszahl dieselbe, so werden Maschinen mit höherer Periodenzahl teuerer als solche mit geringer, weil ihre Polzahl wächst. Diese Maschinen werden jedoch im allgemeinen trotzdem kleiner, da sie größere Umdrehungszahlen haben. Transformatoren besitzen bei höheren Periodenzahlen einen größeren Wirkungsgrad und eine geringere Erwärmung. Die Eisenverluste der Motoren verringern sich mit steigender Periodenzahl und gleichbleibender effektiver Spannung. In Kabelnetzen wird der Ladestrom mit steigender Periodenzahl größer, so daß die Erwärmung der Kabel unter

Umständen wesentlich gesteigert wird. Abweichungen der elektromotorischen Kraft von der Sinusform können gefährlich werden, nicht nur wegen der Steigerung der zugehörigen Stromamplituden, sondern auch, weil sie sogenannte Resonanzerscheinungen [1]) veranlassen. Letztere treten ein, sobald für irgend eine Schwingung von der Periode n, $3n$ . . . . annähernd $\frac{1}{C \cdot \omega} = L\omega$ wird. Die Spannungen, welche dann im Netze auftreten, können bedeutend größer sein als die Klemmenspannung. Resonanzerscheinungen treten insbesondere bei hohen Periodenzahlen auf. Bekanntlich haben die in der Praxis vorkommenden Wellenformen fast niemals die reine Sinusform (I. T., 1. B., S. 117). Jede noch so verwickelte Kurvenform kann nach dem Lehrsatze von Fourier in einer Reihe von Sinusschwingungen aufgelöst werden, wobei die Periodenzahlen ein Vielfaches der Grundperiodenzahl sein können. Bei Wechselströmen tritt zumeist eine Welle besonders hervor. Man bezeichnet dieselbe als den Grundton. Die Wellen höherer Periodenzahlen bezeichnet man entweder als „Höhere Harmonische" oder ähnlich so wie bei den akustischen Erscheinungen als „Obertöne". Es hat sich nun in der Praxis manchmal als notwendig erwiesen die eine oder die andere dieser harmonischen Wellen zu schwächen oder zu tilgen.

Es geschieht dies insbesondere wegen Resonanzerscheinungen. Man bedient sich zu diesem Zwecke derselben Mittel,[2]) welche man bei Gleichstrommaschinen anwendet, um den Verlauf der Spannung zwischen den Bürsten sinusförmiger zu gestalten.

Die Oberflächenwirkung steigt ebenfalls sehr rasch mit der Periodenzahl.

Für Licht und Motoren kann man zwei getrennte Anlagen mit verschiedenen Systemen bauen und mit zwei Maschinenaggregaten verschiedene Frequenzen, Spannungen und Spannungsverluste erzeugen. Solche Anlagen werden jedoch teuer und verwickelt. Arnold-Bragstad-la Cour[3]) haben zur Vermeidung dieses Übelstandes das polyzyklische Stromverteilungssystem erdacht. Dasselbe bezweckt elektrische Arbeit mittels Strömen von verschiedener Spannung und Periodenzahl durch ein und dasselbe Leitungsnetz gleichzeitig zu übertragen und zu verteilen, ohne daß sich diese Ströme gegenseitig beeinflussen.

---

[1]) Gustav Benischke: Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 97 und 143.

[2]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 431.

[3]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 569.



VII. Kapitel.

Induktionsgenerator.

91. Induktionsgenerator. Unter letzterem versteht man einen asynchronen Mehrphasenmotor, welcher rückwärts angetrieben oder über Synchronismus gebracht wird. Solange sich die Geschwindigkeit des asynchronen Motors zwischen Null und der Polwechselzahl (Zykelzahl) der zugeführten Wechselströme befindet, arbeitet derselbe als Motor. Wird der asynchrone Motor nach rückwärts angetrieben, so arbeitet er als eine Bremse, welche die ganze Leistung tilgt. Wird der asynchrone Motor dagegen über Synchronismus gebracht, so arbeitet er als Generator. Der Induktionsgenerator und der Induktionsmotor haben dieselbe theoretische Grundlage. Beim Induktionsgenerator ist jedoch die Schlüpfung negativ zu nehmen und nur der Zustand über Synchronismus zu betrachten, während der Rückwärtsbetrieb von geringer Bedeutung ist. Die Geschwindigkeit nimmt beim Induktionsgenerator mit der Belastung nicht ab, sondern zu. Der Induktionsgenerator ist zur Regulierung der Phasenverschiebung in einem Wechselstromkreise verwendbar, löst in einfachster Weise den Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen und gleicht Schwankungen der Belastung und Spannung aus.

Asynchrone Generatoren benötigen keine Gleichstromerregung, oft sogar keine Schleifringe, sie sind unabhängig von der Antriebsgeschwindigkeit, bei Kurzschluß gehen sie einfach aus, sie haben eine größere Höchstleistung als in dem Falle, wo sie als asynchrone Motoren arbeiten. Besonders hervorgehoben seien die Arbeiten von Steinmetz, Bradley, Leblanc, Marius Latour,[1]) Alexander Heyland[2]) und Max Breslauer.[3])

VIII. Kapitel.

Vor- und Nachteile der Wechselstrommaschinen.

92. Vor- und Nachteile der Wechselströme. In jeder Gleichstrommaschine wird im Anker Wechselstrom erzeugt, so daß jede Gleichstrommaschine auch als Wechselstrommaschine Verwendung finden kann, wenn man statt eines Kollektors Schleifringe anbringt (S. 8).

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 463.

[2]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 28, 356, 533 und 560.

[3]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 193.

93. Vorteile der Wechselströme.

1. Arbeitsübertragung auf große Entfernungen. In Gleichstrommaschinen werden höchstens 2000 bis 5000 Volt erzeugt. R. Thury hat Gleichstrommaschinen bis 12.000 Volt und in jüngster Zeit [1]) eine 25 *K W* Gleichstromdynamo mit 25.000 Volt gebaut. Mit der Maschine zu 25.000 Volt kann man alle bekannten Wirkungen und Erscheinungen der statischen Elektrizität hervorbringen. Z. B. Laden von Leydnerflaschen, Anziehung und Abstoßung leichter Körper, elektrischer Wind, Bildung von Ozon u. s. w. Sie eignet sich sehr gut als Erregermaschine für eine Holzsche Influenzmaschine. Die Hintereinanderschaltung von Gleichstrommaschinen ist nur beschränkt anwendbar. Solche Anlagen wurden von der Compagnie de l'Industrie Electrique in Genf ausgeführt. In Wechselstrommaschinen dagegen kann man Spannungen bis 20.000 Volt und mehr erzeugen. Bei der Niagara-Anlage [2]) soll die Spannung von 12.000 Volt auf 60.000 Volt erhöht werden. Die einzelnen Spulen dieser Maschinen lassen sich leichter isolieren als bei Gleichstrom, sie sind feststehend und luftig untergebracht, so daß ein Durchschlagen selten vorkommt.

2. Die Wechselstrommaschine besitzt keinen Kommutator. Letztere verursacht bei hohen Spannungen Funkenbildung und ist Ursache des Überschlagens von Funken.

3. Anwendbarkeit von ruhenden Transformatoren. Mit letzterer erhält man Spannungen bis zu 100.000 Volt, wenngleich bis heute 60.000 Volt die äußerste Grenze praktisch verwendeter Spannungen sein dürfte.

4. Erzeugung sehr großer Stromstärken bei niedriger Spannung. Bei Gleichstrommaschinen werden die Kollektoren bei sehr großen Stromstärken groß und teuer, außerdem tritt leicht Erwärmung und Funkenbildung ein. Anwendung findet deshalb der Wechselstrom insbesondere in Karbidfabriken.

5. Gleichen Wattverlust in den Leitungen vorausgesetzt, erfordern Drehstrom-Arbeitsübertragungen bei $cos\, \varphi = 1$ nur etwa 75% des Leitungskupfers.

7. In Räumen, in welchen Funkenbildung unzulässig ist, kann man nur Drehstrommotoren aufstellen.

94. Nachteile der Wechselströme.

1. Einphasen-Wechselstrommotoren haben einen geringen Wirkungsgrad und größere Erwärmung als Gleichstrommotoren.

---

[1]) Br. Böhm-Raffay: Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 307.

[2]) Elektrotechnischer Neuigkeitsanzeiger und maschinentechnische Rundschau, 1902, S. 88.



2. Der Gleichstrommotor ist dem Drehstrommotor in Bezug auf die Regulierung der Umdrehungszahl überlegen. *Cos* φ beträgt bei den Drehstrommotoren 0·85 bis höchstens 0·95 und es müssen deshalb die Maschinen um 15 bis 5% größer sein als bei $\cos\varphi = 1$. Die Regulierung der Umdrehungszahl stellt sich bei Gleichstrom ungleich günstiger als bei Wechselstrom.

3. Die Gleichstrombogenlampen sind den Wechselstrombogenlampen überlegen. Letztere benötigt bei der gleichen Lichtstärke mehr Strom.

4. Mit Wechselstrom können nicht ohne Nebenapparate chemische Wirkungen hervorgebracht werden. Man kann deshalb den Wechselstrom in der Elektrochemie, als auch bei den Akkumulatoren zum Laden, nicht ohneweiters verwenden.

5. Wechselströme bewirken in Telephon- und Telegraphenleitungen größere Störungen als Gleichströme. Will man diese Leitungen schützen, so muß man Erdungen von Wechselstromleitungen selbst vom neutralen Punkt ausschließen. Als Schutz dient auch die Schleifenbildung der Telephonleitungen.

6. Kapazität und Selbstinduktion der Stromerzeuger und der Leitungen und der sogenannte Oberflächen(skin)effekt bilden Störungen in Wechselstromnetzen. Letztere verursachen Spannungsabfälle,[1]) wattlose Ströme und erfordern mehr Material. Die wattlosen Ströme vergrößern und verteuern die Wechselstrommaschinen, wenn die Ankerrückwirkung nicht zu groß werden soll. In von Wechselstrom durchflossenen Leitern entsteht ein umlaufendes (zirkulares) Wechselfeld, welches vom Mittelpunkte des Leiters aus nach außen hin abnimmt. Dieses Wechselfeld drängt den Strom von den Leiterteilen nach der Oberfläche. Letzteres tritt insbesondere bei starken Strömen, also bei Niederspannungsmaschinen auf. Man muß deshalb in genanntem Falle den gewöhnlichen Ohmschen Widerstand $W = \frac{C \, . \, L}{Q}$ (I. T., 1. B., S. 17) vergrößern.

7. Parallelschalten ist bei Wechselstrommaschinen (II. T., 2. B., S. 387) schwerer durchführbar als bei Gleichstrommaschinen (I. T., 2. B., S. 185). Bei ersteren müssen die Maschinen beim Parallelschalten absolut synchron laufen. Das Hintereinanderschalten ist bei Wechselstrommaschinen im allgemeinen unmöglich, bei Gleichstrommaschinen (I. T., 2. B., S. 183), insbesondere in Mehrleiteranlagen, sehr vorteilhaft.

---

[1]) **Fischer-Hinnen, J.:** Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 100.

IX. Kapitel.

Vergleich der verschiedenen Wechselstrommaschinen.

95. Einphasenmaschine. Bis zum Jahre 1889 kam nur diese Maschine in Betracht. Heute findet sie nur in Netzen Verwendung, in welchen nur Licht abgegeben wird. Dann sind nur zwei Leitungen erforderlich, ein besonderer Vorteil gegenüber den Mehrphasensystemen. Die Spannungsregulierung ist einfach, während bei Mehrphasenmaschinen die Konstanthaltung der Spannung in den verschiedenen Phasen bei ungleicher Belastung sehr umständlich, häufig sogar unmöglich ist. In Netzen mit vielen Motoren kann man Einphasenmaschinen nicht verwenden; sie erweisen sich auch in Beleuchtungsnetzen nicht so wirtschaftlich als die Mehrphasenmaschinen. Ein Maschinengestell leistet als einphasige Maschine nur 55 bis 75% einer Dreiphasenmaschine. Das gesamte Eisen- und Erregermaterial bleibt dasselbe, das Ankerkupfer jedoch wird etwas geringer. Die Einphasenmaschine hat einen geringen Wirkungsgrad. Bei gleicher Leistung ist der Ankerstrom einer Wechselstrommaschine größer als der einer Dreiphasenmaschine und es muß daher die Ankerrückwirkung und die Streuung einer Einphasenmaschine bedeutend größer sein. Die Streulinien sind dem Strome unmittelbar proportional. Bei gleichem $\cos\varphi$, gleicher Leistung, gleichen Verlusten und gleicher Gebrauchsspannung ist bei Dreiphasenstrom nur 75% des Leitungskupfers erforderlich und nur 25%, wenn ein neutraler Leiter vom Verkettungspunkte aus verwendet wird. Die einphasigen Motoren bleiben weit hinter den Drehstrommotoren zurück. Nachteile der Mehrphasensysteme sind: Verwendung von drei oder vier Leitungen, Mehraufwand an Schaltungsmaterial, Schwierigkeit der gleichmäßigen Verteilung der Stromverbraucher in den einzelnen Zweigen und Konstanthaltung der Spannung in den letzteren. Motoren belasten alle Phasen in gleicher Weise und wirken so bei Mehrphasenströmen ausgleichend.

96. Zwei- und Dreiphasenmaschine. Je mehr Phasen vorhanden sind, desto wirksamer ist die Mehrphasenwicklung. Bei gleicher Leistung wird jedoch der Ankerstrom in der Dreiphasenwicklung größer als in der Zweiphasenwicklung, so daß die erstere eine größere Ankerrückwirkung besitzt. Zwei- und Dreiphasenwicklungen sind demnach annähernd gleichwertig. Die Zweiphasenwicklung ist besonders für Hochspannungsmaschinen leichter herstellbar als die Dreiphasenwicklung. Bei Induktionsgeneratoren mit doppeltem Anker z. B. kann man einen Anker mit der einen Phase, den anderen mit der anderen Phase vollwickeln.

Sind die Wicklungen nicht verkettet, so ist die Regulierung bei Zweiphasenstrom leichter. Für große Entfernungen zieht man den Dreiphasenstrom dem Zweiphasenstrom vor, weil dann die Leitungsverluste, der Ohmsche und der induktive Leitungsabfall bedeutend kleiner sind. Die Leitungsmaterialien außer dem Draht werden bei drei Leitungen billiger als bei vier. Bei den großen Niagara-Übertragungen findet das System Scott Verwendung. Dasselbe besteht aus einer Vereinigung beider Systeme. Auf den Maschinen sind zwei aufeinander senkrecht stehende Wicklungen angebracht, deren Windungszahlen sich wie $1 : {}^1/_2 . \sqrt{3}$ verhalten, und die Zweiphasenströme zur Übertragung werden in ruhenden Transformatoren, welche gleichzeitig hinauf transformieren, in Dreiphasenstrom umgesetzt.

97. Vereinigung von Ein- und Mehrphasensystemen. Man kann z. B. bei einem Mehrphasensystem die Beleuchtung in eine Phase (zwei Leitungen) legen und diesen Zweig auf konstante Spannung regulieren. Die übrigen Leitungen werden nur für Motoren beigezogen. Steinmetz vereinigt in seinem monozyklischen System eine Hauptwicklung mit einer dazu senkrecht liegenden Nebenwicklung. Die Spannungsregulierung gestaltet sich beim Dreiphasenstrom günstig, wenn Maschinen und Stromverbraucher in Dreieck geschaltet sind. Zum Spannungsausgleich sind auch Ausgleichstransformatoren verwendet worden, welche für eine Phase einspulig gewickelt wurden. Nach Grassi kann man gewöhnliche Dreiphasentransformatoren, welche zur Spannungsreduktion gebraucht werden, so schalten, daß sekundär Einphasenstrom abgenommen werden kann und die verschiedenen primären Phasen stets gleiche Belastung erhalten.

98. Gleichpoltype. So wie es auf der Pariser Weltausstellung am besten zum Ausdrucke kam, werden heute fast ausschließlich die Induktions-Wechselstromtypen (Fig. 124 und 125) gebaut, während vor einigen Jahren die Induktions-Gleichpoltype (I. T., 2. B., S. 302) allgemein gebaut wurde. Die Gleichpoltype hat den einen Vorzug, daß alle Wicklungen stillstehen und nur ein Stahlrad rotiert. Infolge der halben zyklischen Magnetisierung ist die magnetische Ausnützung der Maschine unvollkommen, wegen der hohen Sättigungen und großen Streuflächen hat diese Maschine eine sehr große Streuung auch in den umgebenden Eisenmassen. Die große Erregerspule ist teuer und schwer transportierbar. Die Spannungslinien sind häufig unsymmetrisch, so daß die Parallelschaltung bedenklich werden kann. Die Gleichpoltypen werden bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit und bei gleicher Umdrehungszahl schwerer und teuerer als die Wechselpoltypen. Letztere ermöglichen auch eine bessere Lüftung und Zugänglichkeit der Spulen.

Die Gleichpoltype erweist sich nur bei hohen Umdrehungen und großer Umfangsgeschwindigkeit (über 50 *m*) als praktisch vorteilhaft verwendbar.

III. Abschnitt.

Wechselstrommotoren.

I. Kapitel.

Einteilung der ein- und mehrphasigen Wechselstrommotoren.

99. Einteilung der Wechselstrommotoren. Jede Gleichstrommaschine ist zugleich als Gleichstrommotor verwendbar (S. 5). Schickt man in eine Gleichstrommaschine Strom, so läuft sie an und leistet Arbeit. Es gibt also nur eine einzige Art der Gleichstrommotoren. Dagegen unterscheiden wir fünf verschiedene Arten von Wechselstrommotoren, von welchen jedoch nur der asynchrone Induktionsmotor in der Praxis vorwiegend Verwendung findet und deshalb im nachfolgenden am ausführlichsten besprochen werden soll. Von den ein- und mehrphasigen Wechselstrommotoren unterscheiden wir grundsätzlich: 1. Synchronmotoren. 2. Asynchronmotoren. 3. Induktionsmotoren mit Kommutator. 4. Konduktionsmotoren. 5. Hysteresis- und Reaktionsmotoren.

100. Synchronmotoren oder die Umkehrung der gewöhnlichen Wechselstrommaschinen mit Gleichstrom erregten Außen- oder Innenpolen. Synchron heißt gleichzeitig. Während die Wechselstrommaschine vier Polwechsel erzeugt, muß ein vierpoliger Wechselstrommotor eine Umdrehung machen, wenn Maschine und Motor synchron laufen sollen. Haben Generator und Motor gleiche Polzahl, so müssen sie gleiche Umdrehungen ausführen, wenn zwischen denselben Synchronismus herrscht. Wir haben insbesondere die Wechselpoltype (Fig. 124 und 125) und die Gleichpoltype (I. T., 2. B., S. 302) unterschieden. Erregt man eine Wechselstrommaschine (Wechselpol- oder Gleichpoltype) durch Gleichstrom, schickt in den Anker Wechselstrom und wirft rasch den Riemen ab, so läuft dieselbe als Wechselstrommotor weiter. Man kann demnach die ein- und mehrphasigen Wechselstrommaschinen ohneweiters als Synchronmotoren verwenden. Die letzteren Motoren laufen nicht von selbst an, sie müssen durch eine äußere Antriebskraft auf Synchronismus gebracht werden. Zu diesem Zwecke bedient man

sich entweder eines kleinen Induktionsmotors oder eines Kommutatormotors mit Serienwicklung oder der Erregermaschine oder der Akkumulatoren. Wenn der Synchronmotor auf eine Transmission arbeitet, die von einer Dampfmaschine angetrieben wird, so kann man den Synchronmotor von der Transmission antreiben. Wie man z. B. aus Kurvenzeichnungen ersieht, kann der Synchronmotor als Phasenregler Verwendung finden. Er wirkt bei Übererregung als Kondensator, bei Untererregung als Drosselspule und kann deshalb in Wechselstromnetzen die Phasenverschiebung aufheben. Seine Umdrehungen nehmen mit der Belastung etwas ab und können durch Regulierwiderstände innerhalb bestimmter Grenzen verändert werden. Der Anschluß der Motoren kann neben Glüh- und Bogenlampen an das Leitungsnetz erfolgen. Motoren über 20 *PS* werden für Arbeitsübertragungen auf größere Entfernungen für hohe Spannung gebaut. Die Hochspannungsleitungen müssen dann sehr gut isoliert werden, das Eisengestell des Motors ist zu erden. Der umlaufende Teil wird immer für niedere Spannung berechnet. Aufbau und Theorie dieser Motoren wurde nach obigem bereits bei den Wechselstrommaschinen (S. 8—11 und § 65 bis 68) behandelt.

101. Asynchronmotoren, Induktionsmotoren oder Drehfeldmotoren genannt, werden im Gegensatze zu den Synchronmotoren nicht durch Gleichstrom erregt, sondern der Strom im Anker entsteht durch Induktions-(Transformator-)Wirkung. Bei den Asynchronmotoren unterscheidet man Wechselstrommotoren (Einphasenmotoren) und Drehstrommotoren (Mehrphasenmotoren). Die Drehstrommotoren zerfallen in solche ohne Kommutator mit Kurzschlußanker und in solche mit regulierbarem Widerstand im Anker. Da in der Praxis fast nur diese Motoren Verwendung finden, sollen nur sie im folgenden besonders hervorgehoben werden.

102. Induktionsmotoren mit Kommutator sind Induktionsmotoren mit einem Anker nach Art der Gleichstromanker (Repulsionsmotor). Sie bezwecken dem Einphasenmotor ein Anzugsmoment zu erteilen. Die Ankerwicklung ist an einen Kollektor angeschlossen. Die Bürsten werden beim Anlauf zunächst durch einen Widerstand verbunden und dann kurz geschlossen. Die Feldwicklung erscheint an das Netz angeschlossen.

103. Konduktionsmotoren, das sind solche Motoren, bei denen sowohl die feststehende als auch die rotierende Wicklung unmittelbar mit dem Netze leitend in Verbindung stehen. Der Läufer (rotierende Teil) besitzt einen Kommutator. Sie gleichen in vielen Punkten den

Gleichstrommotoren, das Feldgestell muß jedoch lamelliert sein. So wie die Gleichstrommotoren werden auch die Konduktionsmotoren in Serien-, Nebenschluß- und fremd erregte Motoren eingeteilt. Konduktionsmotoren stammen von Heyland, Görges (1891) und Steinmetz.

104. Hysteresis- und Reaktionsmotoren. Das Drehmoment dieser Motoren wird durch die hysteretische Verzerrung oder durch ungleichmäßige magnetische Reluktanz oder Schirmwirkung erzeugt. Das Wesen des Hysteresismotors besteht in folgendem: Wenn man eine Eisenscheibe innerhalb eines Drehfeldes drehbar anordnet, so dreht sich dieselbe infolge der Phasenverschiebung durch Hysteresis.

Diese Drehung erfolgt selbst dann, wenn Wirbelströme gänzlich ausgeschlossen sind.

Ähnlich, so wie durch Hysteresis, kann auch durch eine veränderliche Reaktanz (induktiver Widerstand) pro Zyklus (Polwechselzahl) in Wechselstrommaschinen ein Moment hervorgerufen werden. Die Reaktanz kann sich z. B. mit doppelter Frequenz des Wechselstromes verändern. Die Leistung dieser verzerrten Reaktanz ist entweder positiv (Reaktionsgenerator) oder negativ (Reaktionsmotor). Als Reaktionsmaschine kann jeder Wechselstromgenerator oder Synchronmotor Arbeit leisten.

II. Kapitel.

Asynchronmotoren.

A. Allgemeines.

105. Asynchronmotoren nennt man auch Induktionsmotoren und Drehfeldmotoren. Asynchron bedeutet „nicht gleichzeitig" (nicht synchron). Die Asynchronmotoren zerfallen in Drehstrommotoren (mehrphasige Motoren) und Wechselstrommotoren (einphasige Motoren). Den Asynchronmotoren wird im feststehenden Teil (Ständer) Strom zugeführt, während der umlaufende Teil (Läufer) durch Transformatorwirkung (Induktion) Strom aufnimmt. Bringt man einen Metallzylinder in ein Drehfeld (S. 57), so verhält es sich so, als wenn um diesen Körper ein magnetisches Feld rotieren würde. Letzteres erzeugt in dem Leiter eine *EMK*. Ist derselbe nicht durch Isolatoren unterbrochen, so entstehen in demselben elektrische Ströme, welche nach dem Lenzschen Gesetz der auszuführenden Bewegung entgegengesetzt gerichtet sind. Diese

Ströme suchen das Primärfeld zu schwächen und arbeiten gegen die Drehung des Feldes. Es ist das Streben vorhanden, den Anker mit derselben Geschwindigkeit zu drehen, mit welcher das Feld rotiert. Vollkommen kann dieser Zustand jedoch nicht erreicht werden. Würde sich der Anker genau gleichzeitig (synchron) mit dem Felde drehen, so entstünde im Anker kein Strom. In diesem Falle wäre die Wirkung auf den Anker dieselbe, als wenn Feld und Anker ruhend verblieben. Sobald im Anker kein Strom induziert wird, kann er auch keine Arbeit leisten und bleibt infolge der Reibungswiderstände in der Bewegung zurück. Wenn dies stattfindet, dreht sich das Feld im Anker voran und es werden in demselben wieder Ströme induziert. Jetzt kann der Anker die Reibungswiderstände überwinden und wieder Arbeit leisten. Je größer die Belastung wird, desto mehr bleibt der Läufer hinter der Umdrehungszahl des Feldes zurück. Dadurch werden im Läufer starke Ströme induziert und er kann mehr Arbeit leisten. Je mehr Strom im Läufer fließt, desto mehr erscheint das primäre Feld geschwächt. Es verhält sich nun so wie mit der primären Wicklung eines Transformators. Letztere nimmt mit steigender Belastung immer mehr Strom auf, wenn man die Spannung an den Klemmen konstant erhält.

Die Asynchronmotoren verhalten sich ähnlich wie die Gleichstrommotoren. Das Zurückbleiben der Umdrehungszahl des Läufers hinter der Umdrehungsgeschwindigkeit des Drehfeldes nennt man Schlüpfung. Im unbelasteten Zustande kann man mit einem Umdrehungszähler kaum ein Zurückbleiben der Umdrehungen beobachten. Schickt man in den Ständer einer zweipoligen Wicklung (rechter Teil der Figur 56) einen Strom von 4000 Wechseln in der Minute, d. i. 2000 Perioden in der Minute, so macht der Läufer (beziehungsweise die Magnetnadel in Fig. 56) nahezu 2000 Umdrehungen in der Minute. Wird der Motor belastet, so fällt seine Umdrehungszahl etwa bis auf 1900, 1800. Die Schlüpfung beträgt dann 100, 200 Umdrehungen oder 5, 10%. Dabei wurde eine zweipolige Wicklung (Fig. 56) vorausgesetzt. Gewöhnlich werden jedoch vier-, sechs-, acht- und mehrpolige Motoren gebaut. Ein sechspoliger Motor macht bei 3000 Perioden 1000 Umdrehungen ohne Schlüpfung und einige Prozent weniger Umdrehungen mit Schlüpfung (belastet). Ein vierpoliger Motor macht bei 3000 Perioden 1500 Umdrehungen ohne Schlüpfung. Bezeichnen wir mit $\sim$ die Periodenzahl in der Minute und mit p die Anzahl der Polpaare des Motors, so ist die Umdrehungszahl ohne Schlüpfung $= \frac{\sim}{p}$. Macht ein Drehstrommotor 1500 Umdrehungen und das Drehfeld 1500—150 Umdrehungen, so ist das Resultat dasselbe, als wenn der Motor fast stillstehen und das

Ständerfeld 150 Umdrehungen machen würde. Dann wäre der Strom im Läufer derselbe, die Eisenverluste u. s. w. hätten denselben Wert.

Drehen sich Ständerfeld und Läufer gleich rasch, so wird weder in den Läuferwindungen noch im Eisenkern des Läufers Strom induziert, d. h. bei Synchronismus kann kein Strom entstehen, weil sich das Feld im Läufer dreht, jedoch die Richtung nicht wechselt. Es tritt dann in der gegenseitigen Lage zwischen den Kraftlinien des Ständerfeldes und des Läufers keine Änderung ein. Eine solche tritt erst dann auf, wenn der Läufer zurückbleibt. Dieser Vorgang läßt sich mit zwei Kräften vergleichen, welche in ihrer Richtung zusammenfallen (gleiche Richtung haben). Die Resultierende behält dann die Richtung der einzelnen Kräfte, es tritt in den Richtungen keine Änderung ein. Erst wenn der Läufer in den Umdrehungen zurückbleibt, schließen die Kräfte einen Winkel ein, es bildet sich eine Resultierende und es tritt ein Drehmoment auf. Wenn der Läufer nicht schlüpft, wird er nicht ummagnetisiert. Schlüpft der Läufer, dann wird er ummagnetisiert. Ist die primäre Wechselzahl 100 und die Schlüpfung 5%, so sind nur fünf Ummagnetisierungen beziehungsweise fünf Wechsel vorhanden. Die Wechselzahl ist daher im Eisenkerne (Läufer) sehr gering und derselbe kann daher aus massivem Eisen hergestellt werden. Der Ständer muß unbedingt unterteilt sein, d. h. aus voneinander durch dünnes Papier z. B. isolierten Eisenblechen aufgebaut werden, weil in der Ständerwicklung die vollen primären Wechsel stattfinden. Im letzten Falle, bei 100 Wechseln, wird das Ständereisen 100mal ummagnetisiert.

Die Leistung, welche ein Asynchronmotor verbraucht, ist nicht so wie bei Gleichstrom = Stromstärke × Spannung, sondern wegen der Phasenverschiebung gibt dieses Produkt bei einem Einphasenmotor die scheinbaren Watt bezw. Voltampère, die wirklichen (effektiven) Watt dagegen sind = Stromstärke × Spannung × Leistungsfaktor (S. 39 und 51 und § 44). Der Leistungsfaktor ist bei voller Belastung rund 0·8 und hängt selbstverständlich außer dem Bau und der Berechnung von der Größe der Motoren ab. Er hat bei größeren Motoren einen größeren, bei kleineren Motoren einen kleineren Wert.

Beispiel: Ein Einphasenmotor verbrauche bei 110 Volt 50 Ampère. Wie groß ist die scheinbare und wie groß die wirkliche Leistung?

Scheinbare Leistung = 110 × 50 = 5500 Voltampère.

Wirkliche Leistung = 110 × 50 × 0·8 = 4400 Watt.

Beispiel: Ein Drehstrommotor verbrauche bei 110 Volt Netzspannung 50 Ampère Stromstärke in jedem Leitungszweige. Wie groß ist die scheinbare und wie groß die wirkliche Leistung?

Scheinbare Leistung = 110 × 50 × 1·73 = 9515 Voltampère.

Wirkliche Leistung = 110 × 50 × 1·73 × 0·8 = 7612 Watt.



B. Schaltungen und Wicklungen der asynchronen Motoren.

I. Schaltungen und Wicklungen der Wechselstrommotoren (Einphasenmotoren).

106. Schaltung der Wechselstrommotoren. Fig. 150 zeigt das Schaltungsschema eines Wechselstrommotors. Von den Leitungen L_1 L_2 führt der Strom durch die Sicherungen S_1 S_2 zu dem Ausschalter *A*. Von letzterem geht die Hauptphase *B* unmittelbar zur Hauptleitung des Ständers. Die Hülfsphase *H* tritt durch die Drosselspule *D* zur Hülfswicklung des Ständers. Der Ausschalter *a* ermöglicht das Ein- und Ausschalten der Hülfsphase. Letztere ist nur beim Anlauf zur Erzielung eines Drehfeldes eingeschaltet. Der Widerstand *A* dient zur Erzeugung eines großen Anlaufmomentes beim Einschalten. Dieser Widerstand zerfällt in drei Abteilungen. Es könnten ebensogut drei gewöhnliche Rheostate (I. T., 1. B., Fig. 14), je einer in einer Phase Verwendung finden. So wie es Fig. 150 zeigt, ist in jeder der drei Phasen der ganze Widerstand eingeschaltet. Dreht man die λförmige Kurbel nach rechts, so wird der Widerstand von Kontakt zu Kontakt immer kleiner. Beim normalen Betriebe ist der Widerstand *R* kurzgeschlossen. Diese Schaltung findet zumeist praktische Verwendung.

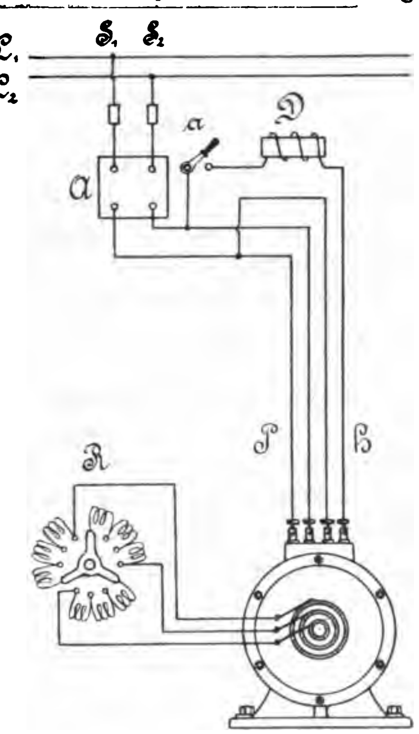


Fig. 150. Wechselstrommotor.

107. Läufer der Wechselstrommotoren. Der Läufer erhält fast immer eine Dreiphasenwicklung, die entweder als Kurzschlußwicklung oder als Phasenwicklung ausgebildet ist.

1. Kurzschlußwicklung.

a) Man verbindet sämtliche Stäbe durch ein Kupferband auf der einen Seite und durch ein zweites Kupferband auf der anderen Seite.

Die Stäbe befinden sich in Nuten oder Öffnungen am Umfange des Läufereisenkernes. Sie sind an der vorderen und an der rückwärtigen Stirnfläche untereinander leitend verbunden.

b) Sämtliche Stäbe, welche gleich oder nahezu gleich induziert sind, werden vorn und rückwärts miteinander verbunden, so daß also die gesamten Stäbe in kurzgeschlossene Gruppen eingeteilt erscheinen.

c) Sämtliche Stäbe, welche gleich oder nahezu gleich induziert werden, verbindet man hintereinander und schließt sie dann kurz.

Kurzschlußanker finden im allgemeinen für geringe Leistungen Verwendung. Schon Motoren von 2 *PS* aufwärts bewirken beim Einschalten lästige Spannungsschwankungen, weil sie dabei viel Strom verbrauchen. Bei größeren Motoren verwendet man deswegen einen Anlasser in den Leitungen zur Ständerwicklung, um Stromstöße beim Anlaufe zu vermeiden. Anlaßwiderstände sind zumeist Flüssigkeitswiderstände, z. B. Eisenelektroden in Sodalösung (S. 263). Für nicht zu hohe Stromstärken können auch gewöhnliche Starkstromwiderstände (I. T., 1. B., S. 20) Verwendung finden.

2. Phasenwicklung (Ring- und Trommelwicklung). Der Läufer erhält dann dieselbe Wicklung wie der Ständer eines Drehstrommotors (§ 110). Zumeist findet Sternschaltung Anwendung. Die drei Anfänge führen dann zu drei voneinander isolierten Schleifringen (Fig. 8 und 125). Die Phasenwicklung wurde bereits früher für eine Drehstrommaschine (Fig. 125) und wird später (§ 109) für einen Drehstromläufer erklärt werden. Um ein großes Anzugsmoment zu erzielen, schaltet man den Läuferwiderstand *R*, Fig. 150, ein.

108. Ständer der Wechselstrommotoren (Einphasenstrom). Der Ständer besitzt eine Zweiphasenwicklung (Fig. 124). Man unterscheidet dann die zwei Phasen in eine Haupt- und eine Hülfsphase und verwendet zumeist eine der folgenden Schaltungen:

1. Die Hauptphase wird an die Klemmen des Netzes geschaltet. Die Hülfsphase liegt beim Anlauf parallel zur Hauptphase. In der Hülfsphase befindet sich, um eine Phasenverschiebung zu erzielen, eine Drosselspule. Sobald der Motor läuft, wird die Hülfsphase ausgeschaltet. Für ganz kleine Motoren (unter 1 *PS*) kann man auch in der Hülfsphase eine Phasenverschiebung dadurch erzielen, daß man sie aus dünnerem Drahte herstellt als die Hauptphase. Man erspart dann die Drosselspule.

2. Die Hauptphase wird an die Klemmen des Netzes geschaltet. In der Hauptphase befindet sich eine Drosselspule. Die Hülfsphase liegt

parallel zur Hauptphase; in ihr befindet sich ein Kondensator. Die Drosselspule bewirkt eine Phasenverschiebung derart, daß der Strom der Spannung nacheilt. Der Kondensator dagegen bewirkt, daß der Strom der Spannung voreilt. Zur Erzeugung einer möglichst großen Phasenverschiebung erweisen sich deshalb Drosselspule und Kondensator gleichzeitig verwendet am geeignetsten.

3. Beim Anlauf wird die Hauptphase an die Klemmen des Netzes geschaltet und dazu parallel die Hülfsphase. Hat der Motor die normalen Umdrehungen erreicht, dann schaltet man die Hülfsphase hinter die Hauptphase. Vor der Hauptphase befindet sich eine Drosselspule, vor der Hülfsphase ein Widerstand. Bei manchen Motoren ist der Widerstand ganz entbehrlich. Nachdem die Hülfsphase verschobenen Strom führt, kann man dieselbe auch wie unter 1. ganz ausschalten.

II. Schaltungen und Wicklungen der Drehstrommotoren.

(Vgl. I. T., 2. B., S. 276.)

109. Schaltung der Drehstrommotoren. Fig. 151 zeigt das Schaltungsschema eines Drehstrommotors mit Kurzschlußanker. Von den Leitungen L_1, L_2 und L_3 des Netzes fließt der Strom durch die Sicherungen S_1, S_2 und S_3 zu dem Schalter A, durch den Anlaßwiderstand R zu den drei Klemmen des Motors. Ein Anlasser findet nur bei größeren Motoren Verwendung. Beim Anlauf ist R eingeschaltet, wird dann nach und nach ausgeschaltet. Im gewöhnlichen Betriebe schließt man den Anlasser kurz.

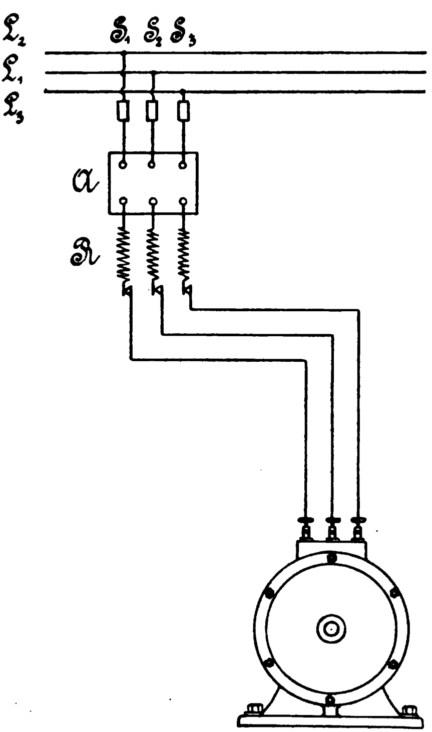


Fig. 151. Drehstrommotor mit Anlasser.

Fig. 152 veranschaulicht das Schaltungsschema eines Drehstrommotors mit Schleifringen am Läufer. Der Strom verläuft von den drei Leitungen des Netzes L_1, L_2 und L_3 durch die Sicherungen S_1, S_2

und S_3 nach dem Ausschalter A zu den drei Klemmen des Motors. Auf den drei Schleifringen des letzteren liegen drei Bürsten oder Bürstenpaare, so daß der Widerstand R in die Läuferwicklung eingeschaltet werden kann. Der Widerstand R wird beim Anlauf eingeschaltet, bei zunehmender Umdrehungszahl ausgeschaltet und beim gewöhnlichen Betrieb kurzgeschlossen.

110. Läufer der Drehstrommotoren. Da der Läufer der Einphasenmotoren ebenso gewickelt ist wie jener der Drehstrommotoren, so sei hier zunächst auf erstere Wicklung verwiesen (107 unter 1). Im folgenden Paragraphen (111) soll der Läufer eines später berechneten Drehstrommotors ausführlich besprochen werden.

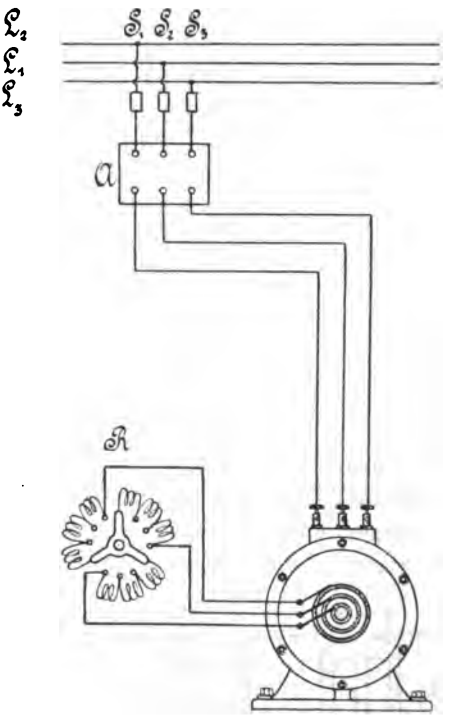


Fig. 152. Drehstrommotor mit Widerstand im Läufer.

111. Läuferwicklung des folgend (S. 232) **berechneten Dreiphasenmotors.** Der Läufer des im nachfolgenden Beispiele behandelten Dreiphasenankers ist mit Stabwicklung versehen und nach Art der Trommelwicklung eingeführt.

Es sind im ganzen 53 Nuten vorhanden und da wir pro Nut zwei wirksame Stäbe haben, ist die Gesamtzahl der wirksamen Ankerleiter am ganzen Umfange gleich $2 \times 53 = 106$.

Um uns über die Anordnung der Wicklung ein deutliches Bild zu verschaffen, denken wir uns in Fig. 153 die auf dem Umfange liegenden Stäbe alle in einer Ebene ausgebreitet. Die Leiter a_2', a_1', a_1, a_2, a_3, a_4 u. s. f. seien gleichbedeutend mit den in Fig. 154 gezeichneten Stäben 1, 2, 1′, 2′, 1″, 2″ u. s. f., den Leitern b_2', b_1', b_1, b_2, b_3, b_4 u. s. f. entsprechen die Leiter 3, 4, 3′, 4′, 3″ 4″ u. s. f.

Da, wie wir aus dem gerechneten Beispiele (S. 240) sehen werden, je zwei obere und je zwei untere Stäbe einer Nut parallel untereinander verbunden sind, können wir uns ja je zwei solchermaßen zusammengehörende Stäbe durch je einen Stab a_1', b_1', a_1, b_1, a_2, b_2 u. s. f. ersetzt denken.

Damit nun eine geschlossene Wicklung zu stande kommt, müssen die Größen y_1 und y_2 in Fig. 153 ganz bestimmten Bedingungen genügen, die hier näher untersucht werden sollen.

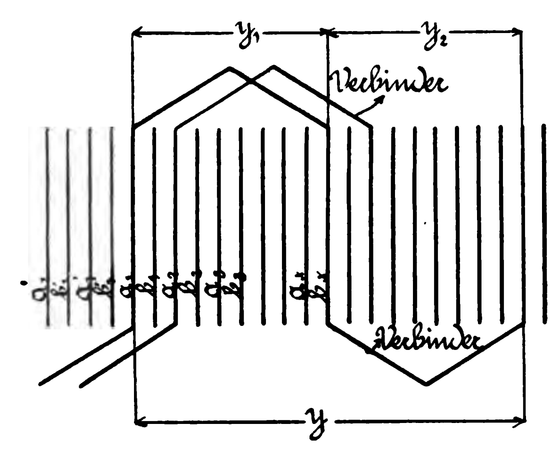


Fig. 153. Anordnung der Läuferwicklung.

Zunächst ist zu bedenken, daß die Verbinder je zweier Stäbe so auszuführen sind, daß wir immer von einem oberen Stabe a, Fig. 154, zu einem unteren Stabe b gelangen. Wir nehmen nämlich an, daß die Stäbe a die oberen, die Stäbe b die unteren, in der Nut befindlichen darstellen. Nur bei dieser Verbindungsweise erhalten wir eine auch wirklich ausführbare Anordnung der Wicklung. Ferner müssen die aufeinanderfolgend verbundenen Stäbe unter aufeinanderfolgenden Polen liegen, damit sich auch die elektromotorischen Kräfte, die in den Leitern induziert werden, addieren können und nicht etwa gegenseitig aufheben. Damit nun alle Stäbe der Reihe nach untereinander verbunden werden, dürfen wir, um y_1 beziehungsweise y_2, Fig. 153, vorwärts schreitend, nach einmaliger Durchschreitung aller Pole des Feldes nicht wieder zu dem Stabe gelangen, von dem wir ausgegangen sind. Denn wir würden sonst eine geschlossene Wicklung von nur so viel Stäben erhalten, als Pole vorhanden sind, und alle übrigen Stäbe wären nicht untereinander verbunden. Wickeln wir jedoch so, daß wir, beispielsweise vom Stabe a_1, Fig. 153, ausgehend, nach einmaliger Durchschreitung aller Pole auf a_2 gelangen, dann zu a_3, a_4 u. s. f. kommen,

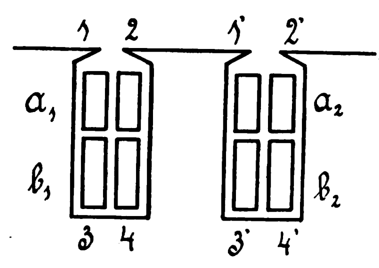


Fig. 154. Stäbe in Nuten (Läufer).

so sind allmählich alle Stäbe untereinander verbunden und wir erhalten schließlich eine geschlossene Wicklung, indem wir wieder auf den Stab a_1 treffen. Während wir allmählich von a_1 zu a_2, dann zu a_3, a_4 u. s. f. gelangen, schreiten wir beim Wickeln vor. Wir hätten aber nach der erstmaligen Durchschreitung aller Pole auf den Stab a_1', nach der zweiten Durchschreitung auf a_2', schließlich auf a_3' u. s. f. gelangen können. In diesem Falle bleiben wir immer um zwei Stäbe zurück, wenn ein Umgang vollendet ist. Wir bezeichnen nun $y_1 + y_2 = y$, Fig. 153, als den gesamten Wickelschritt und nennen denselben verlängert, wenn wir beim Wickeln allmählich vorschreiten, verkürzt dagegen, wenn wir, auf den Ausgangsstab bezogen, beim Wickeln nach je einem vollen Umgange um je zwei Stäbe zurückbleiben. y_1 und y_2 heißt man die Teilschritte und entsprechen dieselben den Stäben, die unter zwei aufeinanderfolgenden Polen miteinander verbunden werden. Der absolute Wert von y ist dabei gleich der Anzahl von Stäben, um welche zwei unter aufeinanderfolgenden gleichnamigen Polen liegende Leiter, die aufeinanderfolgend miteinander verbunden werden, auseinander liegen.

Ist s die Gesamtzahl aller wirksamen Stäbe und gelangen wir, wenn wir von a_1, Fig. 153, ausgehen und einmal alle Pole durchschreiten, zu a_2 oder zu a_1' (je nachdem, ob wir verkürzten oder verlängerten Wickelschritt zulassen wollen), so sind im ersten Falle $(s + 2)$, im zweiten Falle $(s - 2)$ Stäbe gezählt worden, an denen wir beim Wickeln vorbei mußten. Bei p Polpaaren erhalten wir daher, je nach der Art der Wicklung, für den gesamten Wickelschritt y den Ausdruck:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{s \pm 2}{p}.$$

Statt a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3 u. s. f. benennen wir im folgenden die Stäbe mit den Ziffern 1, 2, 3, 4, 5, 6 u. s. f., wobei die ungeraden Zahlen entsprechend den Figuren 153 und 154 die oberen, die geraden Zahlen dagegen die unteren Stäbe in den Nuten darstellen. Gehen wir vom Stabe 1 aus, so hat der Stab, der unter dem nächsten gleichnamigen Pole, wie Stab 1 liegt, die Nummer $1 + y$. y muß also eine ganze Zahl sein. y_1 und y_2 sind dagegen die Teilschritte, die für zwei benachbarte Pole in Betracht kommen. Da immer ein oberer mit einem unteren Stabe, ferner ein unterer mit einem oberen Stabe verbunden wird, d. h. da wir von einem ungerade benannten Stabe zu einem gerade benannten schreiten und umgekehrt, müssen sowohl y_1 als auch y_2 ungerade Zahlen sein. Daraus folgt weiter, daß $y = y_1 + y_2$ eine gerade Zahl sein muß. y_1 kann gleich y_2 sein oder es ist um 2

größer oder kleiner als y_2, wenn $\frac{y_1 + y_2}{2}$ eine gerade Zahl sein sollte. Denn nur in diesen zwei Fällen genügt y den verlangten Anforderungen, d. h. nur in diesen zwei Fällen wird es eine gerade, ganze Zahl.

E. Arnold behandelt in seinem vortrefflichen Werke die Ankerwicklungen [1]) ausführlich.

Wir entscheiden uns für verlängerten Wickelschritt und erhalten, da die Anzahl der wirksamen Stäbe $s = 106$ ist und der vierpolige Motor $p = 2$ Polpaare hat, für y den Wert:

$$y = \frac{s + 2}{p} = \frac{106 + 2}{2} = 54.$$

Dementsprechend wird:

$$y_1 = y_2 = 27;$$
$$y_1 + y_2 = y = 54.$$

Im folgenden ist nun ein Zahlenschema gegeben, aus dem ersichtlich ist, wie die einzelnen Stäbe untereinander verbunden werden. Gehen wir vom Leiter 1 aus, der einen oberen Stab in einer beliebig herausgegriffenen Nut darstellt, so wird derselbe mit dem Stab

$$1 + y_1 = 1 + 27 = 28$$

verbunden. Stab 28 ist mit Stab $28 + y_2 = 28 + 27 = 55$ zu verbinden. Nach 55 kommt $55 + 27 = 82$, schließlich $82 + 27 = 109$, beziehungsweise $109 - 106 =$ Stab 3, da nur 106 Leiter vorhanden sind u. s. f.

Zweckmäßig ist es, das Zahlenschema in so viele vertikale Reihen zerfallen zu lassen, als Pole vorhanden sind. In jeder vertikalen Reihe ist dann zwischen einem beliebigen und dem (vertikal) darauffolgenden Zahlenwerte ein ganz bestimmter, immer gleich bleibender Zahlenunterschied. (In unserem Falle gleich 2.) Additionsfehler sind daher bei dieser Aufschreibung leicht auffindbar. Wir erhalten nun für das Zahlenschema folgende Tabelle:

[1]) Arnold: „Die Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen der Gleichstrom-Dynamomaschinen“.

Wickeltabelle für den berechneten Dreiphasenmotor.

$1 = a_1$	28	55	82
3	30	57	84
5	32	59	86
7	34	61	88
9	36	63	90
11	38	65	92
13	40	67	94
15	42	69	96
17	44	$71 = e_1$	$98 = a_2$
19	46	73	100
21	48	75	102
23	50	77	104
25	52	79	106
27	54	81	2
29	56	83	4
31	58	85	6
33	60	87	8
35	$62 = e_2$	$89 = a_3$	10
37	64	91	12
39	66	93	14
41	68	95	16
43	70	97	18
45	72	99	20
47	74	101	22
49	76	103	24
51	78	105	26
53	$80 = e_3$	**107**	gleichbedeutend mit 1, da nur 106 Stäbe vorhanden sind.

Aus dieser Tabelle entnehmen wir, daß sich die Wicklung in sich selbst schließt. Um nun diese geschlossene Reihenwicklung dreiphasig zu schalten, gehen wir folgendermaßen vor. Nehmen wir an, der Stab Nr. 1 sei der erste Leiter der ersten Phase, und zeichnen wir in Fig. 157 die einzelnen Leiter auf, so ist der Beginn der zweiten Phase, entsprechend 120° Phasenverschiebung, bei Stab Nr. 19, weil die gesamte Teilung zweier aufeinanderfolgender Pole, da in einem sie durchwandernden Leiter ein Wechselstrom von einer Periode erzeugt wird, einem Winkel von 360° entspricht.

Um nun diese geschlossene Reihenwicklung dreiphasig zu schalten, wollen wir, der besseren Übersicht halber, zunächst ein Beispiel mit weniger Stäben wählen und die dort gefundenen Resultate auf unser

Beispiel übertragen. Fig. 155 stellt ebenfalls einen dreiphasigen Anker mit vier Polen dar. Wir haben hier jedoch nur 18 Stäbe am Ankerumfang. Überdies sind in Fig. 155 die Stäbe 1, 2, 3, 4 u. s. f. nebeneinander gezeichnet, während sie in Wirklichkeit untereinander angeordnet sind, was übrigens für unsere Betrachtungen gleichgültig ist. Der Wickelschritt y ergibt sich hier nach unserer Formel zu:

$$y = \frac{s+2}{2} = \frac{18+2}{2} = 10,$$

da wir auch hier verlängerten Schritt annehmen wollen. Wir erhalten ferner: $y_1 = y_2 = 5$ und $y_1 + y_2 = y = 10$.

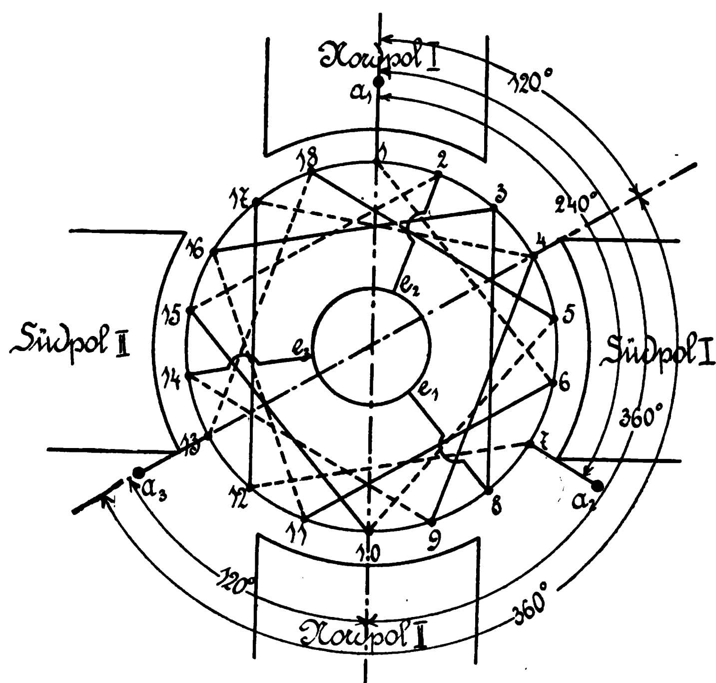


Fig. 155. Läuferwicklung.

Die Wickeltabelle für Fig. 155 würde sich daher folgendermaßen gestalten:

Wickeltabelle für die Figur 155.

1	6	11	16
3	8	13	18
5	10	15	2
7	12	17	4
9	14	**19**	

19 gleichbedeutend mit 1, da nur 18 Stäbe vorhanden sind.

Wir verbinden nun in Fig. 155 die Stäbe entsprechend der obigen Wickeltabelle. Nehmen wir an, Stab 1 sei der Anfangsstab der ersten Phase, so muß der Anfangsstab der zweiten Phase derjenige sein, welcher 120° später in dasselbe Feld tritt, in dem sich Stab 1 in dem Augenblicke befand, den wir bei unserer Betrachtung ins Auge faßten. Dieser Augenblick ist in Fig. 155 der, in welchem Stab 1 in der Mitte des Nordpols *I* liegt. Da die Entfernung der Mitten zweier gleichnamiger Pole, im Bogenmaße ausgedrückt, 360° entspricht (entsprechend dem Verlaufe einer vollen Periode), so finden wir, von der Mitte des Nordpols *I* ausgehend, bei 120° den Stab Nr. 4.

Ebensogut wie Stab 4 können wir aber auch den von 4 gegenüberliegenden, d. h. den von 4 um 360° entfernten Stab Nr. 13 als Anfangsstab der Phase 2 annehmen. Tun wir das, so tritt zwar der Anfangsstab der zweiten Phase nicht 120° später in dasselbe Feld des Nordpols *I*, in dem sich in Fig. 155 gerade der Stab 1 befindet, wohl aber in ein Feld von gleicher Richtung und Stärke, da auch der Nordpol *II* um 120° vorgerückt zu denken ist. Das Ergebnis muß daher

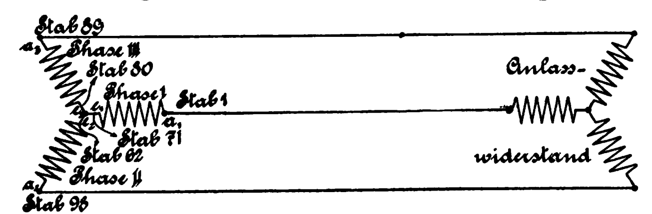


Fig. 156. Läufer samt Anlasser.

auch ein richtiges sein, wenn wir Stab 13 als Anfangsstab der zweiten Phase annehmen. Für Phase *III* finden wir sofort, 240° entsprechend, Stab Nr. 7 als ersten Stab. Würden wir statt Rechtsdrehung des Feldes, wie in Fig. 155 angenommen wurde, Linksdrehung annehmen, so würde, wie aus dem vorhergehenden leicht zu ersehen ist, Stab 13 der Anfangsstab der dritten und Stab 7 der Anfangsstab der zweiten Phase werden. Indem wir nun die Wickeltabelle mit dem in der Figur gewonnenen Ergebnisse vergleichen, erhalten wir also die dreiphasige Wicklung, indem wir je ein Drittel der Stäbe in der Reihenfolge des Schemas abzählen und zu je einer Phase gehörend rechnen. Die Anfänge und Enden der drei Phasen sind daher die folgenden:

$$a_1 = \text{Stab } 1;\ a_2 = \text{Stab } 13;\ a_3 = \text{Stab } 7;$$
$$e_1 = \text{Stab } 8;\ e_2 = \text{Stab } 2;\ e_3 = \text{Stab } 14.$$

Kehren wir nun zu dem berechneten Beispiele zurück, in welchem die Stabzahl gleich 106 ist, so erhalten wir pro Phase $\frac{106}{3}$ Stäbe. Wir

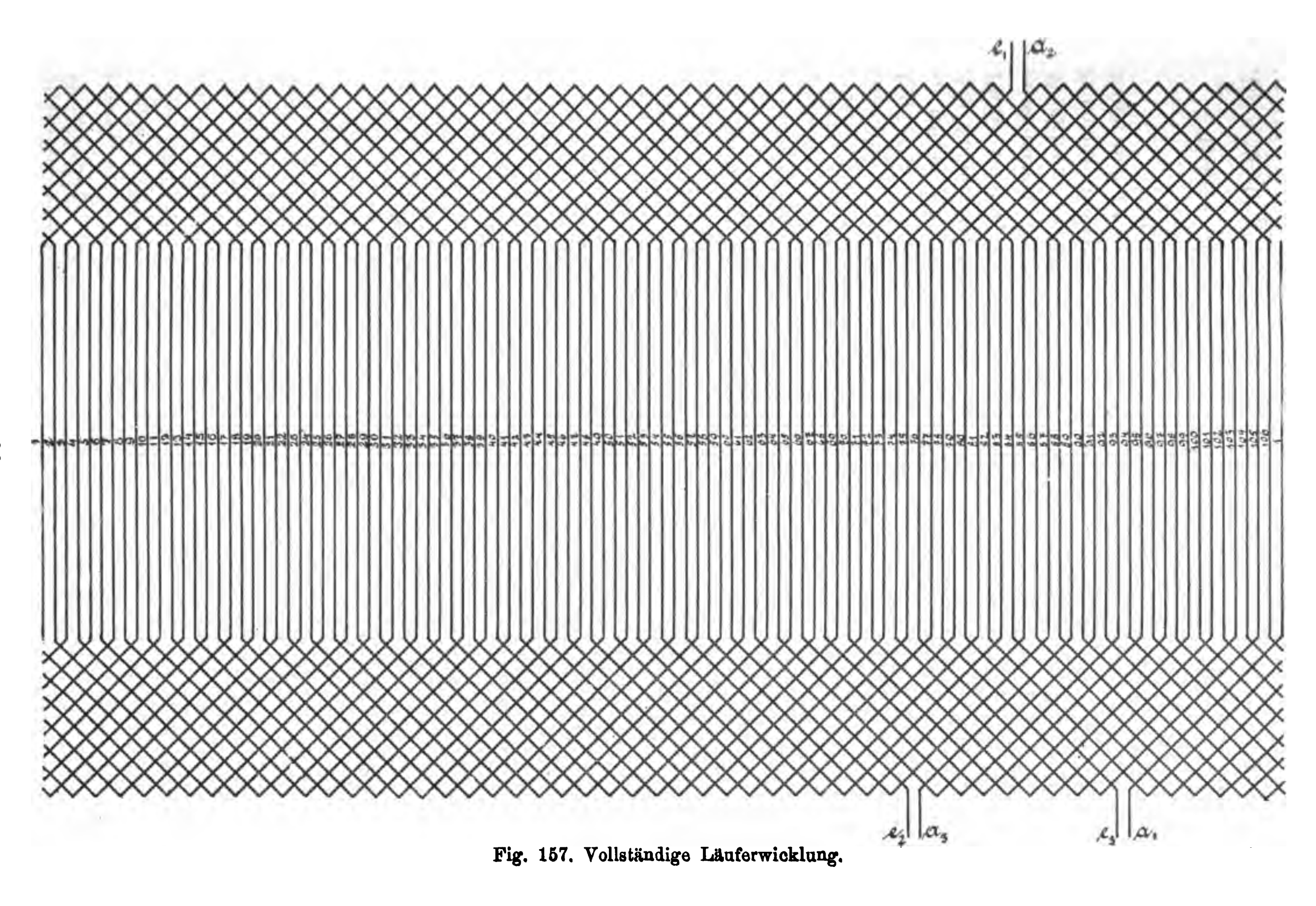


Fig. 157. Vollständige Läuferwicklung.

nehmen für Phase *I* 35, für Phase *II* ebenfalls 35 und für Phase *III* 36 Stäbe. Dementsprechend erhalten wir die Anfänge und Enden der drei Phasen folgendermaßen:

a_1 = Stab 1; e_1 ist der 35ste Stab in der Tabelle, also ist e_1 = Stab 71. a_2 = Stab 98; e_2 ist als (35 + 35)ster der 70ste Stab, also e_2 = Stab 62. Zum Schluß erhalten wir noch: $a_3 = 89$ und $e_3 = 80$. Die Wicklung führen wir in Sternschaltung aus und zeigt Fig. 156 eine schematische Darstellung der Verbindung der Enden der drei Wickelabteilungen untereinander, Fig. 157 die wirkliche Ausführung dieser Wicklung.

112. Ständer der Drehstrommotoren. Der Ständer erhält eine sogenannte Phasenwicklung, welche bereits bei den Wechselstrommaschinen (Fig. 125) und oben (§ 107 unter 2) besprochen wurde.

III. Kapitel.

Theorie des Induktionsmotors.

(Feld- und Stromdiagramm.)

113. Felddiagramm. Um die Vorgänge im Induktionsmotor übersichtlich zu gestalten, soll im folgenden die Ähnlichkeit zwischen elektrischen Stromkreisen und magnetischen Kraftlinienkreisen [1]) zur Anwendung gelangen. Wir vergleichen dabei Ströme mit Feldern, Spannungen mit magnetomotorischen Kräften und elektrische Widerstände mit magnetischen Widerständen.

Bezeichnungen in den Figuren 158 und 159:

M_1 = Magnetomotorische Kraft im Ständer (Stator).

M_2 = Magnetomotorische Kraft im Läufer (Rotor).

E M K = Elektromotorische Kraft.

r_1 = Magnetischer Widerstand des Ständereisens beziehungsweise des Ständerfeldes.

r_2 = Magnetischer Widerstand des Läufereisens beziehungsweise des Läuferfeldes.

r_3 = Magnetischer Widerstand des Luftweges beziehungsweise des Luftfeldes.

ρ_1 = Magnetischer Widerstand des Streufeldes zwischen den Ständerzähnen.

---

[1]) Kuhlmann: Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, Seite 894.
Ossana: Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, Seite 1032.
Sumec: Elektrotechnische Zeitschrift, 1898, Seite 510.

ρ_2 = Magnetischer Widerstand des Streufeldes zwischen den Läuferzähnen.

$$\tau_1 = \frac{r_3}{\rho_1}, \text{ d. h. } \tau_1 = \frac{\text{Magnetischer Widerstand des Luftfeldes}}{\text{Magn. Widerstand des Ständerstreufeldes}}.$$

$$\tau_2 = \frac{r_3}{\rho_2}, \text{ d. h. } \tau_2 = \frac{\text{Magnetischer Widerstand des Luftfeldes}}{\text{Magn. Widerstand des Läuferstreufeldes}}.$$

Um die weiteren Betrachtungen zu vereinfachen, werden allgemein die Widerstände r_1 und r_2 bei den folgenden Entwicklungen vernachlässigt. Dieser Vorgang ist nicht genau, da z. B. an den Punkten c und d (Fig. 158 und 159), bei r_1 = Null nie eine magnetische Potentialdifferenz (Kraftlinien $\times\ r_1$) vorhanden wäre, solange nicht M_1, Fig. 158 und 159, selbst der Sitz einer solchen ist. Eine solche Potentialdifferenz besteht jedoch immer, wenn Kraftlinien im Widerstand r_1 fließen. Wir schließen uns jedoch dem Vorgange, $r_1 = r_2$ = Null zu setzen, an.

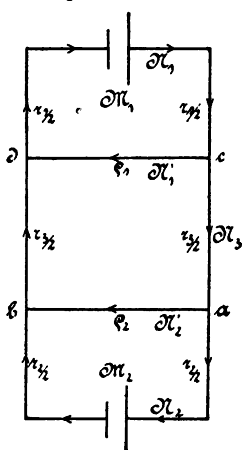


Fig. 158. Vorgang im Induktionsmotor.

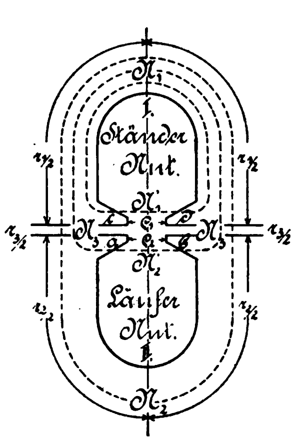


Fig. 159. Kraftlinienverlauf im Induktionsmotor.

Untersuchen wir nun zuerst die Verhältnisse, die auftreten, wenn wir nur den Ständer erregt denken, dann die entsprechenden Vorgänge bei ausschließlich erregt gedachtem Läufer und schließlich vereinigen wir beide Resultate, die in ihrer Summenwirkung naturgemäß die wirklich zu stande kommenden Verhältnisse darstellen.

Wir benützen die folgenden Bezeichnungen:

$N_{1,a}$ = Ständerfeld bei nicht erregtem Läufer (M_2 = Null).

$N_{2,a}$ = Läuferfeld bei nicht erregtem Läufer (M_2 = Null).

$N_{3,a}$ = Luftfeld bei nicht erregtem Läufer (M_2 = Null).

$N_1{}',_a$ = Streufeld zwischen den Ständerzähnen bei nicht erregtem Läufer (M_2 = Null).

$N_2'{}_{,a}$ = Streufeld zwischen den Läuferzähnen bei nicht erregtem Läufer (M_2 = Null).

$N_{1,b}$ = Ständerfeld bei nicht erregtem Ständer (M_1 = Null).

$N_{2,b}$ = Läuferfeld bei nicht erregtem Ständer (M_1 = Null).

$N_{3,b}$ = Luftfeld bei nicht erregtem Ständer (M_1 = Null).

$N_1'{}_{,b}$ = Streufeld zwischen den Ständerzähnen bei nicht erregtem Ständer (M_1 = Null).

$N_2'{}_{,b}$ = Streufeld zwischen den Läuferzähnen bei nicht erregtem Ständer (M_1 = Null).

N_1 = Ständerfeld,
N_2 = Läuferfeld,
N_3 = Luftfeld,
N_1' = Streufeld zwischen den Ständerzähnen,
N_2' = Streufeld zwischen den Läuferzähnen,
bei gleichzeitiger Wirkung von M_1 und M_2, d. h. bei einem beliebigen Betriebszustande des Motors.

a) Denken wir uns nur den Ständer erregt, d. h. M_2 = Null, so erhalten wir:

$N_2'{}_{,a}$ = Null, da bei r_2 = Null zwischen *a* und *b* keine Potentialdifferenz herrscht, also auch keine Kraftlinien vorhanden sind;

$$N_{2,a} = N_{3,a} = \frac{\text{Magnetomotorische Kraft}}{\text{Magnetischer Widerstand}} = \frac{M_1}{r_3};$$

$$N_1'{}_{,a} = \frac{M_1}{\rho_1};$$

$$N_{1,a} = N_1'{}_{,a} + N_{3,a} = M_1\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_3}\right) = \frac{M_1}{r_3}\left(\frac{r_3}{\rho_1} + 1\right) = \frac{M_1}{r_3}(1 + \tau_1).$$

b) Denken wir uns nur den Läufer erregt, so erhalten wir, da jetzt M_1 = Null ist, ähnlich:

$N_1'{}_{,b}$ = Null, da bei r_1 = Null zwischen *c* und *d* keine magnetische Potentialdifferenz vorhanden ist;

$$N_{1,b} = N_{3,b} = \frac{M_2}{r_3};$$

$$N_2'{}_{,b} = \frac{M_2}{\rho_2};$$

$$N_{2,b} = N_2'{}_{,b} + N_{3,b} = M_2\left(\frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_3}\right) = \frac{M_2}{r_3}\left(\frac{r_3}{\rho_2} + 1\right) = \frac{M_2}{r_3}(1 + \tau_2).$$

c) Vereinigen wir beide Wirkungen, d. h. betrachten wir einen beliebigen Betriebszustand des Motors, in welchem sowohl M_1 als auch M_2 vorhanden ist, so erhalten wir:

$$N_1 = N_{1,a} + N_{1,b} = \frac{M_1}{r_3}(1 + \tau_1) + \frac{M_2}{r_3} = \frac{1}{r_3}(M_1(1 + \tau_1) + M_2);$$

$$N_2 = N_{2,a} + N_{2,b} = \frac{M_1}{r_3} + \frac{M_2}{r_3}(1 + \tau_2) = \frac{1}{r_3}(M_2(1 + \tau_2) + M_1);$$

$$N_3 = N_{3,a} + N_{3,b} = \frac{M_1}{r_3} + \frac{M_2}{r_3} = \frac{M_1 + M_2}{r_3};$$

$$N_1' = N_1'{}_{,a} + N_1'{}_{,b} = \frac{M_1}{\rho_1} \begin{pmatrix}\text{nach } b \text{ auch gleich } N_1'{}_{,a}, \\ \text{da } N_1'{}_{,b} \text{ Null ist}\end{pmatrix};$$

$$N_2' = N_2'{}_{,a} + N_2'{}_{,b} = \frac{M_2}{\rho_2} \begin{pmatrix}\text{nach } a \text{ auch gleich } N_2'{}_{,b}, \\ \text{da } N_2'{}_{,a} \text{ Null ist}\end{pmatrix}.$$

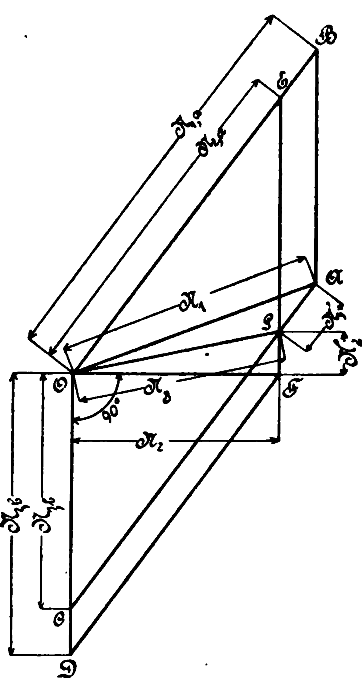


Fig. 160. Felddiagramm.

Die in c gewonnenen Resultate sind in Fig. 158 zum Ausdrucke gebracht, d. h.: Hier finden wir die Felder N_1, N_2, N_l, N_1' und N_2'.

Zeichnen wir das in den Entwicklungen a, b und c entsprechende Felddiagramm, so erhalten wir Fig. 160. Wir ziehen zunächst: $\overline{OD} = N_{2,b}$; die Richtung von $N_{2,b}$ ist zugleich die Richtung des Läuferstromes, da dieser $N_{2,b}$ hervorbringt (Fall b, M_1 = Null). Dieselbe Richtung hat aber auch die *E M K* im Läufer, der als induktionsfreier Widerstand betrachtet werden kann. Diese *E M K* wird vom Läuferfeld N_2 induziert. Wir betrachten alle Vorgänge pro Phase und haben es daher mit oszillierenden Feldern zu tun, von denen wir annehmen, daß sie das Sinusgesetz befolgen. Da die induzierte *E M K* im Läufer ein Maximum ist, wenn die Feldänderung von N_2 am größten ist, und umgekehrt, ist die Richtung von N_2 senkrecht zur Richtung von $\overline{OD}$. Hat N_2 die Größe $\overline{OF}$ und ziehen wir $\overline{OE} \parallel \overline{DF}$ und $\overline{FE} \parallel \overline{OD}$, wobei $\overline{OE} = \overline{DF}$ wird, so ist da: $\overline{EO} + \overline{OD} = N_2$, $\overline{OE}$ nach den Entwicklungen in c dem Felde $N_{2,a}$ gleich. Machen wir $\overline{OC} = N_{1,b}$ und ziehen $\overline{CG} \parallel \overline{OE} \parallel \overline{DF}$, so wird:

$$\overline{OG} = \overline{OE} + \overline{OC} = N_{2,a} + N_{1,b} = N_{3,a} + N_{3,b} = N_3,$$

wie aus den Fällen a, b und c hervorgeht.

Wird noch $\overline{OB} \parallel \overline{CA} = N_{1,a}$ gezeichnet, so erhält man:

$$\overline{OA} = \overline{OB} + \overline{OC} = N_{3,a} + N_{3,b} = N_3.$$

Wir haben ferner:

$$\overline{GA} = \overline{OB} - \overline{OE} = N_{1,a} - N_{2,a} = (N_1'{}_{,a} + N_{3,a}) - N_{3,a} = N_1'{}_{,a},$$

oder nach c, da $N_1'{}_{,a} = N_1'$, so erhalten wir: $\overline{GA} = N_1'$.

Ähnlich bekommt man: $\overline{FG} = N_2'$.

Ferner ist:

$$\frac{\overline{OB}}{\overline{OE}} = \frac{N_{1,a}}{N_{2,a}} = \frac{M_1}{r_3} \cdot (1 + \tau_1) : \frac{M_1}{r_3} = 1 + \tau_1,$$

$$\frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} = \frac{N_{2,b}}{N_{1,b}} = \frac{M_2}{r_3} \cdot (1 + \tau_2) : \frac{M_2}{r_3} = 1 + \tau_2.$$

Im Felddiagramm, Fig. 160, ist daher:
$\overline{OA} = N_1 =$ dem Ständerfeld,
$\overline{OG} = N_3 =$ dem Luftfeld,
$\overline{OF} = N_2 =$ dem Läuferfeld,
$\overline{GA} = N_1' =$ dem Streufeld zwischen den Ständerzähnen,
$\overline{FG} = N_2' =$ dem Streufeld zwischen den Läuferzähnen.

114. Stromdiagramm. Die weitere Verfolgung der Vorgänge soll unter Zuhülfenahme eines Stromdiagrammes erfolgen. Es sei hier nochmals erwähnt, daß wir uns nur mit den Vorgängen in einer Phase beschäftigen und, um für die Verhältnisse im Ständer und Läufer denselben Maßstab verwenden zu können, die Windungszahl ξ für Ständer und Läufer gleichsetzen, wie das ja für alle ähnlichen Diagramme geschieht. Die magnetomotorische Kraft M_1 ist gleich $\frac{4\pi}{10} \cdot i_1 \cdot \xi = c \cdot i_1$, die magnetomotorische Kraft M_2 auf Grund der getroffenen Voraussetzung $c \cdot i_2$.

Mit Sumec[1]) wollen wir uns mit dem Dreieck OAB, Fig. 160, beschäftigen. Es ist in Fig. 160:

$$\overline{OB} = N_{1,a} = \frac{M_1}{r_3} \cdot (1 + \tau_1) = \frac{c \cdot i_1}{r_3} \cdot (1 + \tau_1);$$

$$\overline{OA} = N_1 = \frac{1}{r_3} \cdot (M_1 (1 + \tau_1) + M_2) = \frac{c}{r_3} \cdot (i_1 (1 + \tau_1) + i_2);$$

$$\overline{AB} = \overline{OC} = N_{1,b} = \frac{M_2}{r_3} = \frac{c \cdot i_2}{r_3}.$$

$\frac{c}{r_3}$ nennen wir c_1.

i_1 bedeutet den Ständer-, i_2 den Läuferstrom.

Um von der Feldgröße $N_{1,a}$ auf den Ständerstrom i_1 zu gelangen, haben wir $N_{1,a}$ durch $\frac{c}{r_3} \cdot (1 + \tau_1) = c_1 \cdot (1 + \tau_1)$ zu dividieren. In Fig. 161, die ein Stromdiagramm darstellt, sei $OB_1 = i_1$. Das Dreieck OA_1B_1 ist dem Dreieck OAB in Fig. 160 ähnlich und verhalten sich die Seiten beider Dreiecke, z. B. $OB : OB_1$ wie $c \cdot (1 + \tau_1) : 1$.

[1]) Sumec: Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, Seite 177.

Daher ist $O\,A_1 = \frac{N_1}{c_1 \cdot (1+\tau_1)}$ und stellt eine Stromgröße vor, die das Feld N_1 erzeugt und die wir als Magnetisierungsstrom bezeichnen. Wir nennen $O\,A_1 = i_m$. Ferner ist:

$$A_1\,B_1 = \frac{N_{1,\,l}}{c_1 \cdot (1+\tau_1)} = \frac{c_1 \cdot i_2}{c_1 \cdot (1+\tau_1)} = \frac{i_2}{1+\tau_1}.$$

Nach Fig. 161 ist nun:

$$O\,B_1 = i_1,$$

$$A_1\,B_1 = \frac{i_2}{1+\tau_1}, \quad 1)$$

$$O\,A_1 = i_1 + \frac{i_2}{1+\tau_1} = i_m, \quad 2)$$

Somit erhalten wir:

$$\left(\frac{i_2}{1+\tau_1}\right)^2 = i_1{}^2 + i_m{}^2 - 2\,i_1 \,.\, i_m \,.\, \sin\varphi_1, \quad 3)$$

indem wir statt $\cos\,(90-\varphi_1)$, $\sin\varphi_1$ setzen.

Ziehen wir die Hülfslinien $\overline{A_1\,H}$ und $\overline{A_1\,J}$, so folgt aus den ähnlichen Dreiecken $A_1\,B_1\,H$ und $A_1\,B_1\,J$:

$$\frac{\overline{A_1\,B_1}}{\overline{B_1\,H}} = \frac{\overline{B_1\,J}}{\overline{A_1\,B_1}},$$

$$\overline{A_1\,B_1}^2 = \overline{B_1\,J} \,.\, \overline{B_1\,H} = \left(\frac{i_2}{1+\tau_1}\right)^2.$$

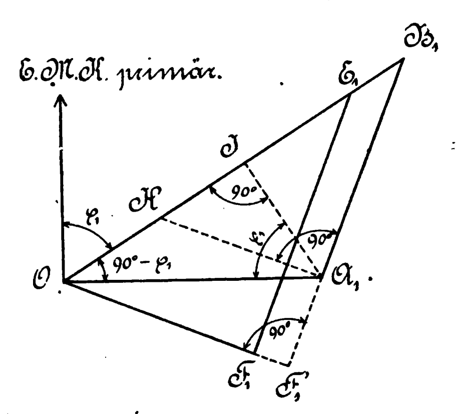


Fig. 161. Stromdiagramm.

Ferner folgt aus den ähnlichen Dreiecken $E_1\,O\,F_1$ und $B_1\,H\,A_1$.

$$\frac{\overline{B_1\,H}}{\overline{O\,E_1}} = \frac{\overline{B_1\,A_1}}{\overline{F_1\,E_1}} \quad \text{oder:} \quad \overline{B_1\,H} = \overline{O\,E_1} \,.\, \frac{\overline{B_1\,A_1}}{\overline{F_1\,E_1}}.$$

Wir fanden auf Seite 205: $\frac{\overline{OB}}{\overline{OE}} = 1 + \tau_1$. Das gleiche gilt wegen dem ähnlichen Dreiecke OAB, Fig. 160, und OA_1B_1, Fig. 161, auch für

$$\frac{\overline{OB_1}}{\overline{OE_1}}.$$ Es ist daher:

$$\overline{OE_1} = \frac{\overline{OB_1}}{1 + \tau_1} = \frac{i_1}{1 + \tau_1}.$$

In Fig. 160 verhält sich: $\frac{\overline{OD}}{\overline{OC}} = \frac{\overline{EF}}{\overline{AB}} = (1 + \tau_2)$ (Seite 204).

Da sich aber $\frac{\overline{EF}}{\overline{AB}}$ wie $\frac{\overline{E_1F_1}}{\overline{A_1B_1}}$ verhalten muß, wird

$$\frac{\overline{B_1A_1}}{\overline{F_1E_1}} = \frac{1}{1 + \tau_2}.$$ Wir erhalten daher für:

$$\overline{B_1H} = \overline{OE_1} \cdot \frac{\overline{B_1A_1}}{\overline{F_1E_1}} = \frac{i_1}{1 + \tau_1} \cdot \frac{1}{1 + \tau_2}.$$

Ferner ist: $\overline{B_1J} = \overline{OB_1} - \overline{OJ} = i_1 - i_m \,.\, sin\,\varphi_1$; es wird daher, wenn man für $\overline{B_1J}$ und $\overline{B_1H}$ die zuletzt gefundenen Werte einsetzt:

$$\left(\frac{i_2}{1 + \tau_1}\right)^2 = \frac{i_1}{(1 + \tau_1) \,.\, (1 + \tau_2)} \,.\, (i_1 - i_m \,.\, sin \quad) \quad 4)$$

Wir erhalten aus 3:

$$i_1^2 + i_m^2 - 2\, i_1 \,.\, i_m \,.\, sin\,\varphi_1 - \left(\frac{i_2}{1 + \tau_1}\right)^2 = \text{Nu l},$$

und wenn wir für $\left(\frac{i_2}{1 + \tau_1}\right)^2$ den Wert aus Gleichung 4 einsetzen:

$$i_1^2 + i_m^2 - 2\, i_1 \,.\, i_m \,.\, sin\,\varphi_1 - \frac{i_1^2}{(1+\tau_1)\,.\,(1+\tau_2)} + \frac{i_1 \,.\, i_m \,.\, sin\,\varphi_1}{(1+\tau_1)\,.\,(1+\tau_2)} = \text{Null},$$

oder:

$$i_1^2 \,.\, \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \,.\, \tau_2}{(1 + \tau_1) \,.\, (1 + \tau_2)} + i_m^2 - i_1 \,.\, i_m \,.\, sin\,\varphi_1 \,.\, \frac{2\,(1 + \tau_1) \,.\, (1 + \tau_2) - 1}{(1 + \tau_1) \,.\, (1 + \tau_2)}.$$

Setzen wir für $\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \,.\, \tau_2$ den Wert τ und für $(1 + \tau_1) \,.\, (1 + \tau_2)$ den Wert $1 + \tau$ ein, so erhalten wir:

$$i_1^2 \,.\, \frac{\tau}{1 + \tau} + i_m^2 - i_1 \,.\, i_m \,.\, sin\,\varphi_1 \,.\, \frac{1 + 2\,\tau}{1 + \tau} = \text{Null.} \quad 5)$$

Aus Gleichung 5 folgt der Zusammenhang zwischen dem Primärstrom i_1 und dem Winkel φ_1 (Phasenverschiebungswinkel zwischen dem Primärstrom und der primären EMK) in Abhängigkeit vom Magnetisierungsstrom i_m. Vernachlässigen wir den Ohmschen Spannungs-

abfall im Ständer, d. h. rechnen wir mit konstanter primärer *EMK*, so bleibt auch der das senkrecht zu dieser stehende und konstante Ständerfeld schaffende Strom i_m konstant und ändert auch seine Lage nicht. Abgesehen von hohen Eisensättigungen und den inneren Verlusten im Motor gilt Gleichung 5 für jeden Betriebszustand des Motors.

Gleichung 5 läßt sich auf die Mittelpunktsgleichung eines Kreises bringen. Wir entnehmen aus Fig. 162:

$$y = i_1 \cdot \cos\varphi_1, \quad x = i_1 \cdot \sin\varphi_1,$$

$$i_1 = \frac{y}{\cos\varphi_1} = \frac{x}{\sin\varphi_1},$$

$$x^2 + y^2 = i_1^2.$$

Wir setzen diese Werte in 5 ein und erhalten:

$$(x^2 + y^2) \cdot \frac{\tau}{1+\tau} + i_m^2 - \frac{x}{\sin\varphi_1} \cdot i_m \cdot \sin\varphi_1 \cdot \frac{1+2\tau}{1+\tau} = \text{Null}. \quad 6)$$

Um die Mittelpunktsgleichung des Kreises zu erhalten, muß $(x^2 + y^2)$ gleich dem Quadrate einer Konstanten, die gleich dem Kreisradius ist, sein, d. h. das Glied mit x muß Null werden. Denken wir uns die y Achse nach y' um den Betrag α verschoben, so ist die neue Abszisse, bezogen auf den Punkt O_1, x'. Wir haben nunmehr nach Fig. 162: $x = \alpha - x'$, wobei x' die Abszisse des Punktes B_1 bezogen auf O_1 bedeutet.

Setzen wir in Gleichung 6 statt x den Wert $\alpha - x'$ ein und dividieren beide Seiten der Gleichung durch $\frac{\tau}{1+\tau}$, so erhalten wir:

$$x'^2 - 2x' \cdot \alpha + \alpha^2 + y^2 + i_m^2 \cdot \frac{1+\tau}{\tau} - \alpha \cdot i_m \cdot \frac{1+2\cdot\tau}{\tau}$$

$$+ x' \cdot i_m \cdot \frac{1+2\cdot\tau}{\tau} = \text{Null}.$$

Ordnen wir diese Gleichung, so wird:

$$x'^2 + y^2 + x'\left(i_m \cdot \frac{1+2\tau}{\tau} - 2\alpha\right) = -i_m^2 \cdot \frac{1+\tau}{\tau} + \alpha \cdot i_m \cdot \frac{1+2\cdot\tau}{\tau} - \alpha^2.$$

Damit das Glied mit x' Null werde, muß $\alpha = i_m \cdot \frac{1+2\tau}{2\cdot\tau}$ sein.

Setzen wir den gefundenen Wert für α ein, so erhalten wir:

$$x'^2 + y^2 = -i_m^2 \cdot \frac{1+\tau}{\tau} + \frac{i_m^2 \cdot (1+2\cdot\tau)^2}{2\cdot\tau^2} - i_m^2 \cdot \frac{(1+2\cdot\tau)^2}{4\cdot\tau^2} \text{ oder}$$

$$x'^2 + y^2 =$$

$$= \frac{i_m^2 \cdot (-4\cdot\tau - 4\cdot\tau^2 + 2 + 8\cdot\tau + 8\cdot\tau^2 - 1 - 4\cdot\tau - 4\cdot\tau^2)}{4\tau^2} = \frac{i_m^2}{4\tau^2}.$$

Der Punkt B_1 bewegt sich also für verschieden große Primärströme, d. h. für die verschiedenen Belastungen auf einem Kreisbogen,

dessen Radius gleich $\sqrt{\frac{i_m^2}{4\tau^2}} = \frac{i_m}{2\tau} = r$ ist. Der größte mögliche Strom i_1 ist durch die Strecke $\overline{OA'_1}$ dargestellt und heißt der ideale Kurzschlußstrom des Motors. Wir werden jedoch später sehen, daß infolge der inneren Verluste im Motor der wirkliche Kurzschlußstrom die Größe $\overline{OA_1'}$ nicht erreichen kann.

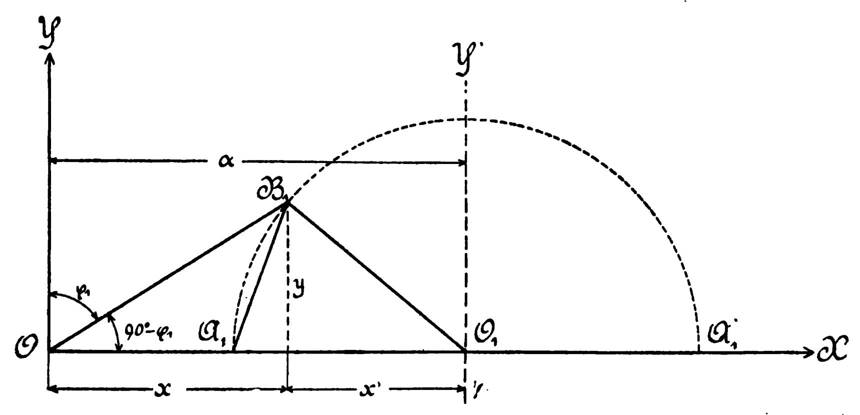


Fig. 162. Stromdiagramm.

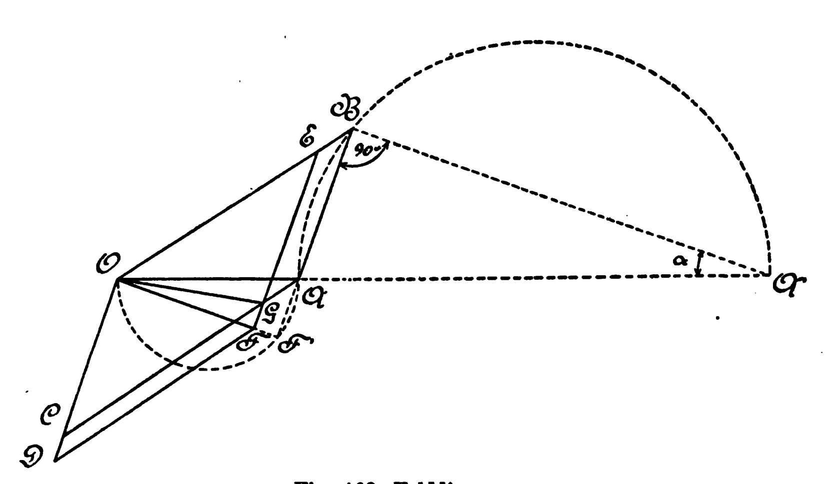


Fig. 163. Felddiagramm.

Wiederholen wir in Fig. 163 das frühere Felddiagramm (Fig. 160), so gilt für dasselbe, da sich die Ströme und Felder nur durch die Konstante C_1 $(1 + \tau_1)$, wie auf Seite 1 auseinandergesetzt wurde, unterscheiden, ebenfalls ähnliches wie es für die Ströme festgestellt wurde. Das heißt, ist $OB = N_{1,a}$ (statt i_1), so bewegt sich auch der Punkt

B auf einem Kreisbogen, dessen Radius gleich $\frac{\overline{OA}}{2\tau}$ ist. Damit alle Verhältnisse für die übrigen Größen ungeändert bleiben, muß sich auch der Punkt F' auf einem Kreisbogen vom Durchmesser $\overline{OA}$ bewegen. Ziehen wir $\overline{BA'}$ senkrecht auf $F'B$, so erkennen wir ohneweiters, daß das Läuferfeld $\overline{OF}$ und die Strecke $\overline{BA'}$ immer in einem ganz bestimmten konstanten Verhältnisse stehen, gleichgültig wo sich der Punkt B am großen Halbkreise befindet. Voraussetzung ist natürlich, daß der Punkt F' am kleinen Halbkreise immer in der Verlängerung von $\overline{BA}$ zu liegen kommt.

Die Strecke $\overline{BA'}$ stellt daher eine dem Läuferfeld proportionale Größe vor. Das wirkliche Ständerfeld $\overline{OA} = N_1$ ist bei konstanter elektromotorischer Gegenkraft immer konstant und kann daher auch die Größe $\overline{OA'}$ (statt OA) als Maß für das Ständerfeld N_1 angesehen werden. An diesen Annahmen wird nichts geändert, solange es sich immer nur um Proportionalität handelt, wenn wir das Felddreieck OAB, Fig. 163, wieder durch das Stromdreieck OA_1B_1, Fig. 164, ersetzen. Wir zeichnen in Fig. 164 daher abermals das Stromdreieck OA_1B_1 auf, bestimmen den Durchmesser $2r = \overline{A_1A_1'}$ aus $\frac{OA_1}{\tau}$ (entsprechend $\frac{i_m}{2\tau} = r$) und ziehen den Halbkreis $A_1B_1A_1'$. Als Winkel im Halbkreis ist $\sphericalangle A_1B_1A_1'$ ein rechter. B_1A_1' gibt ein Maß für das Läuferfeld, OA_1' ein Maß für das Ständerfeld. OA_1' stellt wie im früheren Stromdiagramm den Magnetisierungsstrom, OB_1 den Primärstrom und A_1B_1 den $\frac{\text{Sekundärstrom}}{1+\tau_1}$ dar.

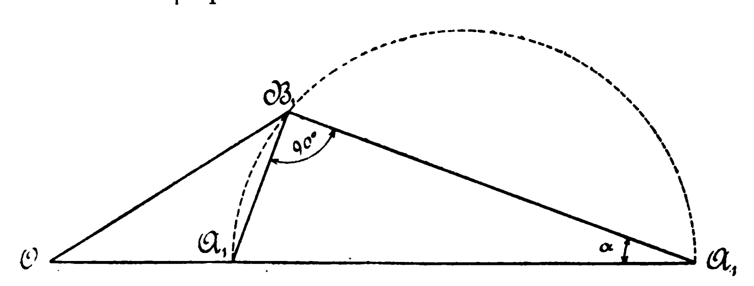


Fig. 164. Entwicklung des Heylandschen Diagrammes.

115. Heylandsches Diagramm. Fig. 164 entspricht dem Heylandschen Diagramm, das wir nun als Grundlage der weiteren Untersuchungen annehmen wollen. Auch setzen wir bei der Herleitung der verschiedenen interessierenden Diagrammgrößen A_1B_1 unmittelbar

gleich dem Sekundärstrom (der gleicher Windungszahl primär und sekundär entsprechen würde), wie es auch Heylands[1]) Vorgang erfordert. Wie letzterer, ermitteln wir von einigen Diagrammgrößen nur relative Werte. Die Bestimmung der absoluten Werte folgt aus den weiteren Berechnungen; an einem Beispiele wird der Gebrauch des Diagrammes für absolute Werte erläutert werden. Gegeben sei i_1, i_m und $\cos \varphi_1$. Wir tragen in Fig. 165 $\overline{O A_1} = i_m$ auf, errichten die Senkrechte $\overline{Om}$, welche die Richtung der Spannung (genauer der EMK) angibt, und tragen unter dem $\sphericalangle \varphi_1$ den Strom $i_1 = \overline{O B_1}$ der Richtung und Größe nach auf. Im Mittelpunkte von $\overline{B_1 A_1}$ errichten wir eine Senkrechte. Dieselbe schneidet die verlängerte Gerade $\overline{O A_1}$ im Punkte O_1, welcher der Mittelpunkt des Heylandschen Kreises ist. Nun wird der Kreis $A_1 B_1 A_1'$ gezogen. Wir führen das Zeichen $\equiv$, das „Proportionalität" bedeuten soll, ein und erhalten der Reihe nach folgende Beziehungen für die einzelnen Größen.[2])

1. Zugeführte Watt. Die zugeführten Watt sind, wenn wir e_1 die Phasenspannung und mit i_1 den Primärstrom pro Phase bezeichnen, gleich $3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos \varphi_1$ oder $\equiv i_1 \cdot \cos \varphi_1$. Ziehen wir in Fig. 165 die Senkrechte $\overline{B_1 b}$, so ist: $\overline{B_1 b} = i_1 \cdot \cos \varphi_1$, d. h.:

$\overline{B_1 b} \equiv$ der zugeführten Leistung.

Diese Beziehung gilt für jeden beliebig großen Primärstrom i_1, also für jeden beliebigen Punkt am Halbkreise.

2. Drehmoment des Läufers.[3]) Das Drehmoment T, das der Läufer entwickelt, ist proportional dem Produkte: Läuferfeld $\times$ Läuferstrom. Es ist also:

$T \equiv \overline{B_1 A_1'} \cdot \overline{B_1 A_1}$, oder, da $\sphericalangle A_1' B_1 A_1 = 90^0$ ist, gilt auch:

$T \equiv$ der Fläche des Dreieckes $A_1' \cdot B_1 \cdot A_1$.

Diese Fläche ist aber auch gleich $\overline{B_1 b} \cdot \overline{A_1 A_1'}$. Da $A_1 A_1'$ konstant bleibt, ist die Fläche proportional $\overline{B_1 b}$, daher:

$$T \equiv \overline{B_1 b}.$$

Das Drehmoment fällt jedoch wegen der Verluste im Motor kleiner aus. Der Ohmsche Spannungsabfall im Ständer hat eine Verminderung der EMK zur Folge. Da das Ständerfeld dieser EMK proportional ist, wird infolge des Spannungsabfalles auch das Ständerfeld und daher auch das Läuferfeld kleiner. Das Drehmoment muß daher ebenfalls geringer ausfallen. Heyland berücksichtigt diese Feldschwächung

[1]) Heyland: Sonderausgabe aus der Sammlung elektrotechnischer Vorträge, 1900, Seite 11, Z. 9 v. o.

[2]) Heyland: Sonderausgabe aus der Sammlung elektrotechnischer Vorträge, 1900, Seite 11. Kapp: Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom, 1899, Seite 440 ff.

[3]) Siehe auch E. Berckenbrink: Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 245.

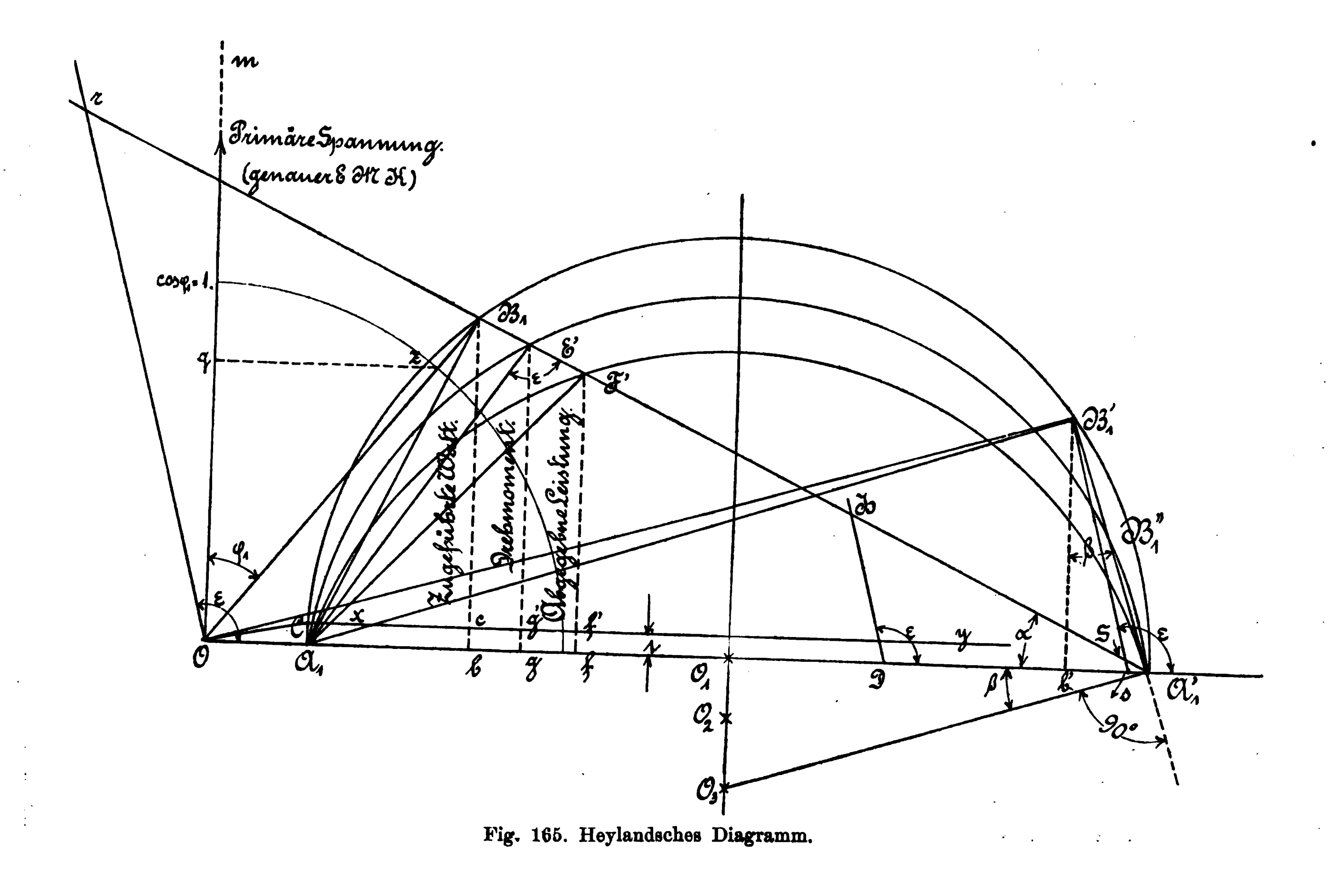


Fig. 165. Heylandsches Diagramm.

derart, daß er von der Klemmenspannung den Betrag $i_2 \cdot r_1$ subtrahiert und um die entsprechende Größe das Läuferfeld schwächt. r_1 ist der Ohmsche Widerstand pro Phase des Ständers. Er vernachlässigt dabei den Spannungsabfall durch den Magnetisierungsstrom. Der Vorgang ist nicht einwandfrei, der Fehler jedoch nicht groß. Hat man auf diese Weise für einen beliebigen Betriebszustand, z. B. für den Punkt B_1 einen Punkt E' bestimmt und zieht durch $A_1\ E'\ A_1'$ über der Sehne $\overline{A_1'\ A_1}$ einen Kreisbogen, so ist dieser der geometrische Ort aller auf die eben beschriebene Weise reduzierten Ankerfelder für jeden beliebigen Betriebszustand. Es geht das aus Fig. 166 hervor.

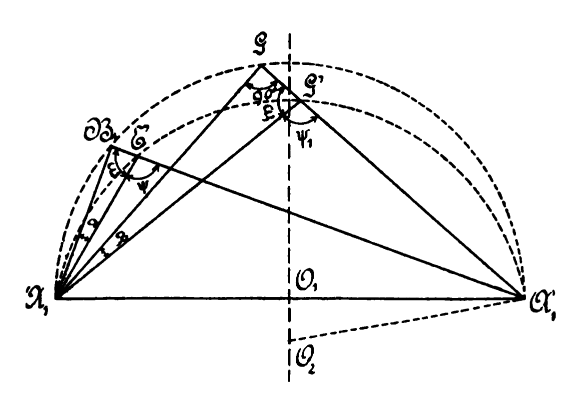


Fig. 166. Geometrischer Ort aller Ankerfelder.

Die Größen $B_1\ E'$ und $G\ G'$ für den Strom i_2 beziehungsweise i_2' sind, da sie $i_2 \cdot r_1$ beziehungsweise $i_2' \cdot r_1$ proportional sind, auch proportional den betreffenden Strömen.

Es muß also: $\frac{\overline{G\ G'}}{\overline{A_1\ G}} = \frac{\overline{B_1\ E'}}{\overline{A_1\ B_1}}$ sein. Ist der geometrische Ort wirklich ein Kreis, so ist $\sphericalangle\ \psi_1 = \sphericalangle\ \psi$, als Peripheriewinkel über gleichem Bogen. Dann ist aber auch $\sphericalangle\ \omega_1 = \sphericalangle\ \omega$ und die Dreiecke $A_1\ G\ G'$ und $A_1\ B_1\ E'$ sind ähnlich. Damit ist aber auch die Bedingung $\frac{\overline{G\ G'}}{\overline{A_1\ G}} = \frac{\overline{B_1\ E'}}{\overline{A_1\ B_1}}$ erfüllt und der Kreisbogen hat seine Richtigkeit. Das Drehmoment für den Punkt B_1, Fig. 165, wird nun:

$$T \equiv \overline{E'\ A_1'} \cdot \overline{B_1\ A_1}$$

Nach Fig. 167 wäre also $T \equiv \overline{E'\ A_1'} \cdot \overline{A_1\ B_1} \equiv d \cdot f$

$f = (b + c) \cdot \cos\beta$,

$d = \frac{a}{\sin\alpha}$; $\cos\beta$ ist, da sich α und β für jeden Betriebszustand

zu 90° ergänzen, gleich *sin* α. Wir erhalten daher ür:

$$d \,.\, f = \frac{a}{sin\,\alpha} \,.\, (b + c) \,.\, sin\,\alpha = \text{Konstante} \,.\, a.$$

a ist nach Fig. 165 und 167 aber gleich $\overline{E'g}$ und wir können auch schreiben:

$$T \equiv \overline{E'g}.$$

Es gibt also jetzt die reduzierte Höhe ein Maß für das Drehmoment an und gelten ähnliche Betrachtungen für jeden beliebigen Betriebszustand. Die im Motor auftretenden Reibungs- und Eisenverluste schwächen ebenfalls das Drehmoment ab. Diese Verluste werden in der Literatur konstant angenommen und sei der Abstand i, Fig. 165, der Geraden $\overline{xy}$ von $\overline{OA_1'}$ der Betrag, welcher von $\overline{E'g}$ noch abzuziehen sei. Wir erhalten schließlich für den Punkt B_1:

$$T \equiv \overline{E'g'}.$$

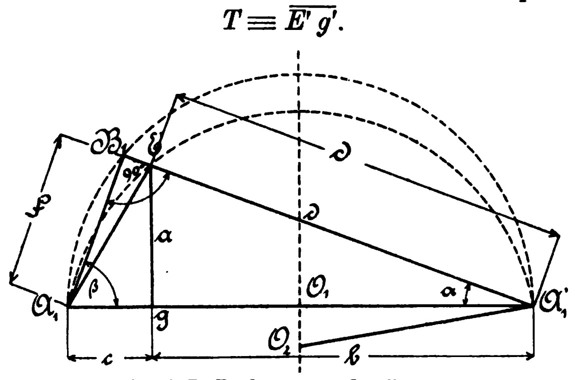


Fig. 167. Drehmoment des Läufers.

3. Abgegebene Leistung. Berücksichtigen wir in ähnlicher Weise wie bei der Bestimmung des Drehmomentes des Läufers die Kupferverluste im Läufer, ferner die Eisen- und Reibungsverluste im entsprechenden Maßstab durch den Abstand i, so erhalten wir, da alle Verluste eliminiert erscheinen, in der Geraden $F'f'$ ein Maß für die abgegebene Leistung.

Wir wollen nun nachweisen, daß wir die Kupferverluste im Läufer nicht zu berechnen brauchen, wenn wir den Kurzschlußstrom kennen. Bei Kurzschluß des Motors, d. h. bei stillstehendem Anker, wird die gesamte zugeführte Arbeit in Wärme verwandelt und keine Leistung abgegeben. Der wirkliche Kurzschlußstrom kann nicht durch die Strecke $\overline{OA_1'}$ dargestellt werden, da die Kupfer- und Eisenverluste im Diagramm durch eine entsprechende Höhe, proportional der beim Kurzschluß zugeführten Arbeit, zum Ausdruck gelangen müssen. Um den Halbkreis für die abgegebene Leistung zu bestimmen, halten wir uns vor Augen,

daß dieselbe in diesem Falle, da der Läufer feststeht, Null ist. Ist in Fig. 165 $\overline{O B_1'}$ der Kurzschlußstrom, $\overline{B_1' A_1'}$ beziehungsweise $B_1'' A_1'$ das zugehörige Läuferfeld und ziehen wir auf $\overline{B_1' A_1'}$ die Senkrechte $\overline{A_1' O_3}$, so erhalten wir für den Halbkreis der abgegebenen Leistung den Mittelpunkt O_3. Die Richtigkeit dieser Behauptung folgt daraus, daß nur bei dieser Konstruktion die abgegebene Leistung beim Kurzschluß des Motors Null wird. Der Schnittpunkt des Läuferfeldes $B_1' A_1'$ mit dem Halbkreis fällt in den Punkt A_1', eine Höhe beziehungsweise ein Schnittpunkt mit dem Kreise von Mittel O_3, die das Maß für die abgegebene Leistung vorstellt, ist nicht vorhanden, was der Leistung Null entspricht.

4. Wirkungsgrad. Derselbe wird rechnerisch bestimmt und aus dem Quotienten:

$$\frac{\text{Abgegebene Leistung}}{\text{zugeführte Leistung}} \text{ ermittelt.}$$

5. Schlüpfung. Die Stromstärke im Läufer ist proportional dem Produkte Läuferfeld $\times$ Schlüpfung, weil die Schlüpfung einer Geschwindigkeit entspricht, mit welcher das Feld die Läuferstäbe schneidet. Es ist also:

$$\text{Läuferfeld} \times \text{Schlüpfung} \equiv \text{Läufer } EMK \equiv \frac{\text{Läufer } EMK}{\text{Läuferwiderstand}} \equiv$$
$$\equiv \text{Läuferstrom.}$$

Wir haben daher auch:

$$\text{Schlüpfung} \equiv \frac{\text{Läuferstrom}}{\text{Läuferfeld}}.$$

In Fig. 165 wäre für den Punkt B_1:

$$\text{Schlüpfung} \equiv \frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{E' A_1'}}.$$

Ziehen wir in Fig. 165 im beliebig gewählten Punkte D eine Gerade so, daß $\sphericalangle\, \varepsilon = \sphericalangle\, A_1' D H$ wird, so folgt, weil

$$\triangle\, A_1' D H \sim \triangle\, A_1' E' A_1,$$
$$\frac{\overline{HD}}{\overline{A_1' D}} = \frac{\overline{E' A_1}}{\overline{E' A_1'}}.$$

$\overline{E' A_1}$ ist immer dem zugehörigen Läuferstrome proportional. Das folgt aus Fig. 166, da dort:

$$\frac{\overline{A_1 B_1}}{\overline{E' A_1}} = \frac{\overline{A_1 G}}{\overline{G' A_1}} = \text{konstant ist;}$$

wir haben daher: $\overline{E' A_1} = \text{Konstante} \times \text{Läuferstrom } \overline{A_1 B_1}$.

Ändern wir für alle möglichen Primärströme die Größe $\overline{A_1' D}$ nicht, so können wir dieselbe als Konstante fortlassen und wir erhalten:

$$\overline{H D} \equiv \frac{\text{Konstante} \times \overline{A_1 B_1}}{\overline{E' A_1'}} \equiv \frac{\text{Läuferstrom}}{\text{Läuferfeld}} \equiv \text{Schlüpfung.}$$

Bei Kurzschluß (stillstehendem Läufer) ist die Schlüpfung 100%. Ziehen wir nun zu $H D$ in Fig. 165 eine Parallele $\overline{s B'_1}$ so, daß sie durch den Kurzschlußpunkt B_1', geht, so gibt die Strecke $\overline{s B_1'}$, wenn wir dieselbe „100" nennen, direkt die absolute Schlüpfung in Prozenten an. $\overline{s S}$ stellt also die prozentuelle Schlüpfung beim Strome $\overline{O B_1}$ dar. Für kleine Schlüpfungen empfiehlt es sich, im Punkte O unter dem Winkel ε (Fig. 165) eine Parallele $\overline{O r}$ zu $\overline{s B_1'}$ zu legen. Die Schlüpfung kann an dieser Parallelen im Verhältnis $\frac{\overline{O A_1'}}{\overline{s A_1'}}$ vergrößert abgelesen werden.

6. Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$. Zieht man von O aus einen Kreisbogen mit dem Radius 1 und verlängert die primären Stromgrößen bis zum Schnittpunkt z, so gibt die Strecke $\overline{O q}$ (senkrecht zu $\overline{q z}$) in Fig. 165 schließlich die Schlußgröße $\cos \varphi_1$ an.

IV. Kapitel.

Formeln zur Berechnung von Drehstrommotoren.

116. Hauptabmessungen in Abhängigkeit von der Leistung.

Gisbert Kapp [1]) gibt für die Beziehung zwischen den Hauptabmessungen und der Leistung eines Drehstrommotors die erfahrungsmäßige Formel:

$$L_2 = C \,.\, D^2_{1i} \,.\, l \,.\, n_1 \,.\, 10^{-6}. \quad 1)$$

und bezeichnet mit:

L_2 die abgegebene Leistung des Motors in PS,
C einen empirischen Koeffizienten,
D_{1i} den inneren Ständerdurchmesser in cm,
l die Länge des Ständers (beziehungsweise Läufers) in cm.
n_1 die minutlichen Umdrehungen des Läufers bei Leerlauf.

Gisbert Kapp gibt C für 100 Polwechsel zu 0·50 bis 0·70 an.

Erfahrungsgemäß geben diese Werte von C schwere Maschinen und kann man bei 100 Wechseln bis zu $C = 1·0$ im Mittel gehen.

117. Bestimmung der elektromotorischen Kraft ($E M K$).

Allgemein ist die Formel für eine $E M K$, die in Z hintereinander geschalteten Leitern entsteht:

$$E M K = v \,.\, B \,.\, l \,.\, Z \,.\, 10^{-8} \text{ Volt. (S. 129)} \quad 2)$$

[1]) Gisbert Kapp: Elektromechanische Konstruktionen, 1902.

Dabei bedeutet:

EMK die elektromotorische Kraft in Volt,

v die Geschwindigkeit, mit welcher das Feld die Ankerstäbe schneidet,

l die Länge eines Leiters, soweit derselbe mit dem Felde in Berührung steht (bei Dynamos und Motoren in der Regel gleich der Polschuh beziehungsweise Ständerbreite),

B die Induktion pro 1 cm^2,

Z die Zahl der hintereinander geschalteten Leiter.

Wenden wir Formel 2 zunächst auf eine Drehstrommaschine an und bezeichnen mit:

D_{1i} den Ständerdurchmesser,

n_1 die minutlichen Umdrehungen des Polrades,

p die Polpaarzahl,

τ_p die Polteilung,

$\sim_1$ die sekundliche Periodenzahl (des Ständerstromes),

$\frac{b}{\tau_p}$ das Verhältnis $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}}$

und schreiben

$$v = \frac{\pi \,.\, D_{1i} \,.\, n_1}{60}, \text{ so ist, da } \pi \,.\, D_{1i} = 2\, p\, \tau_p \text{ gibt:}$$

$$v = \frac{2\,p \,.\, \tau_p \,.\, n_1}{60} = 2 \,.\, \sim_1 \,.\, \tau_p.$$

Wir erhalten daher aus 2:

$$EMK = 2 \,.\, \sim_1 \,.\, \tau_p \,.\, B \,.\, l \,.\, Z \,.\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Setzen wir für den Kraftlinien ausstrahlenden Querschnitt Q das Produkt Polbogen $\times$ Ankerbreite (beziehungsweise Polschuhbreite) ein, so wird $Q = b \,.\, l$. Die Gesamtkraftlinienzahl ist $N = B \,.\, Q = B \,.\, b \,.\, l$, woraus $B = \frac{N}{b \,.\, l}$ folgt. Setzen wir diesen Wert in der für die EMK zuletzt gefundenen Gleichung ein, so erhalten wir:

$$EMK = 2 \,.\, \sim_1 \,.\, \frac{\tau_p}{b} \,.\, N \,.\, Z \,.\, 10^{-8} \text{ Volt.} \quad 3)$$

Im folgenden bestimmen wir mittelst Formel 3 die EMK, die in einer Phase eines Dreiphasengenerators erzeugt wird.[1]) Fig. 168 stelle die Wicklung eines solchen dar und wird nur die voll ausgezogene Phase in Betracht gezogen. Wir wählen $\frac{b}{\tau_p} = \frac{2}{3}$ und erhalten daher

[1]) Gisbert Kapp: Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom, 1899, Seite 322 und 323.

aus Formel 3:

$$E\,M\,K = 2 \,.\, \sim_1 \,.\, \frac{3}{2} \,.\, N \,.\, Z \,.\, 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Da die Reihenfolge der Leiter *I*, *II*, *III*, *IV*, *V* und *VI* keine derartige ist, daß beim Vorbeiwandern eines Poles beim Austreten eines Leiters aus dem Felde sofort ein anderer dafür eintritt, wird die *E M K*, die induziert wird, nicht für jeden Augenblick konstant bleiben, also Formel 3 nicht ohneweiters angewendet werden können. Lassen wir wieder (S. 132) einen Pol eine ganze Teilung τ_p weiterwandern, so gibt Fig. 169 das Bild des zeitlichen Verlaufes der entstehenden *E M K* einer Phase. Indem wir die Polbreite mit 6 Teilen annahmen und die Breite *S*

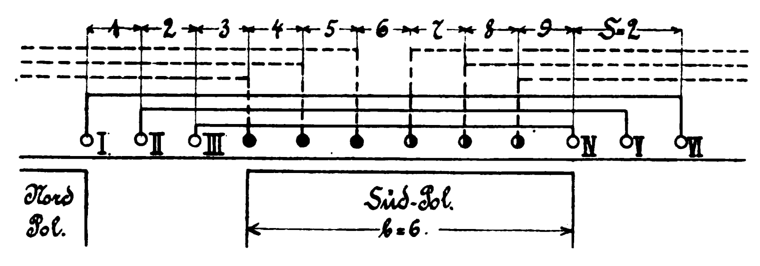


Fig. Wicklung eines Dreiphasengenerators.

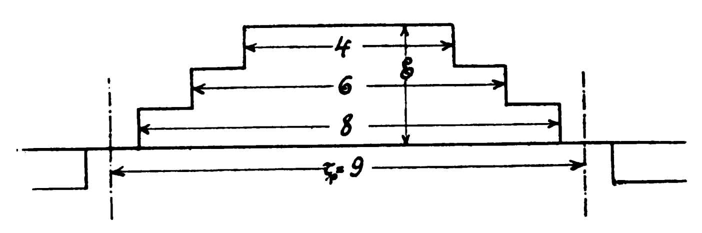


Fig. 169. Zeitlicher Verlauf der induzierten *E M K* einer Phase.

einer Spulenseite 2 ist, behält die *E M K* ihren Höchstwert *E* während des Weges 4 bei. Da dem eben genannten Wege 4 in Fig. 169 ein vom Pol zurückgelegter Weg 6 entspricht und daher der Leiter *I*, wenn wir von demselben ausgehen, beim Weiterschreiten des Poles von 6 bis 7, Fig. 168, wieder aus dem Felde austritt, was einer Verminderung der *E M K* gleichkommt, ist das ohneweiters klar. Da wir drei Löcher für eine Spulenseite haben, erhält die treppenförmige Gestalt der *E M K*-Kurve drei Absätze, die einander gleich sind. Um nun die gemessene *E M K* zu erhalten, haben wir, da der Effektivwert *e* definiert ist, durch $e = \sqrt{\text{Mittelwert aller Ordinatenquadrate}}$, in Fig. 169 alle Ordinaten zu quadrieren, den Mittelwert zu bilden und daraus die Quadratwurzel zu ziehen.

Wir erhalten, indem wir im folgenden die effektive *E M K* einer Phase mit e_1' bezeichnen:

$$\text{Fläche}\left\{9\, e_1'^2\right\} = \text{Fläche}\left\{E^2 . \left[4 . 1 + 2 . \left(\frac{2}{3}\right)^2 + 2 . \left(\frac{1}{3}\right)^2\right]\right\}.$$

Dabei ist e_1' der Effektiv- und E der Höchstwert der *E M K*. E ist mit dem Wert identisch, der sich aus Formel 3 ergibt. Wir erhalten weiter:

$$3\, e_1' = E . \sqrt{4 + \frac{8}{9} + \frac{2}{9}} = 2{\cdot}256\, E \text{ und}$$

$$e_1' = 0{\cdot}752 . E.$$

Setzen wir diesen Wert in Gleichung 3 ein, wobei $\frac{b}{\tau_p}$ wie angenommen $\frac{2}{3}$ ist, so erhalten wir die effektive *E M K* e_1' einer Phase zu:

$$e_1' = 0{\cdot}075 . 2 . \sim_1 . \frac{3}{2} . N . Z . 10^{-8} = 2{\cdot}26 . \sim_1 . N . Z . 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Z bedeutet, entsprechend den drei treppenförmigen Absätzen der *E M K*-Kurve, die Drahtzahl einer Phase, die wir von nun an immer mit Z_1 bezeichnen wollen. Allgemein ist:

$$e_1' = c_1 . \sim_1 . N . Z_1 . 10^{-8},$$

wobei c_1 von der Wicklungsanordnung und dem Verhältnis $\frac{b}{\tau_p}$ abhängig ist.

Beim Drehstrommotor liegen nun die Verhältnisse insofern anders, als wir es in diesem Falle nicht mit einem vorbeiwandernden Felde von konstanter (beziehungsweise annähernd konstanter) Intensität längs des ganzen Kraftlinienquerschnittes zu tun haben.

Nehmen wir an, daß in die Leiter des Ständers sinusförmiger Drehstrom eingeleitet wird, so erhalten wir, wenn wir den Augenblick herausgreifen, in welchem in Phase *I* der Strom $+ J$ (Höchstwert), in Phase *II* und *III* die Ströme $- \frac{J}{2}$ fließen, folgendes Bild, Fig. 170, für das entstehende Feld.[1]) Um den räumlichen Feldverlauf zeichnerisch darstellen zu können, nehmen wir an, der Strom $+ J$ in Phase *I* schaffe das Feld 1; die Ströme $- \frac{J}{2}$ in Phase *II* und *III* erzeugen dann das Feld $- \frac{1}{2}$ und die algebraische Summe der Einzelwerte gibt das für diesen Augenblick in Betracht kommende wirklich entstehende Feld.

---

[1]) **Heubach**: Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, Seite 302.

Bestimmt man nun die *E M K* einer Phase, die diesem im Ständer auftretenden Felde entspricht, indem man sich dasselbe an den Leitern vorbeibewegt denkt, so erhält man nach Heubach für c_1 den Wert $c_1 = 2{\cdot}104$, wenn man den Augenblick betrachtet, der Fig. 170 entspricht. Dieser Wert gilt für drei Löcher pro Spulenseite. Man kann allgemein, ohne Fehler von Belang, setzen:

$$e_1' = 2{\cdot}1 \,.\, \sim_1 \,.\, N \,.\, Z_1 \,.\, 10^{-8}, \quad 4)$$

wenn die Wicklung verteilt ist, d. h. wenn zwei, drei oder mehrere Löcher für eine Spulenseite vorhanden sind.

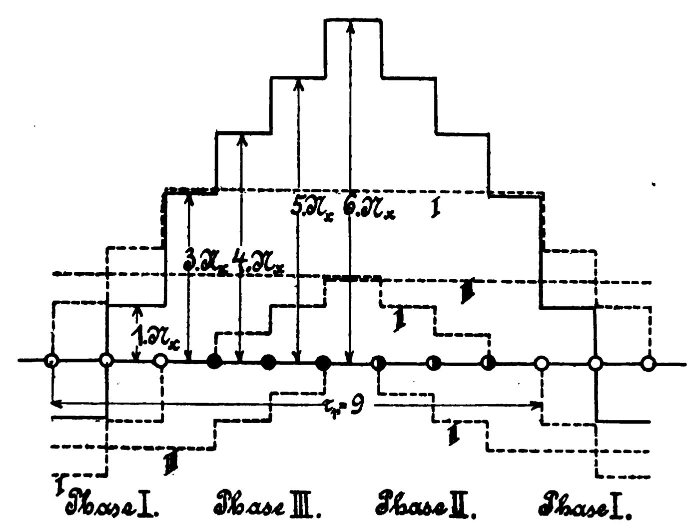


Fig. 170. Feld eines Drehstrommotors.

N bedeutet dabei immer die gesamte Kraftlinienzahl, die an einem Ständerpol austritt, und wird in der Folge mit N_1 (zum Ständer gehörig) bezeichnet. *Z* soll in der Folge, wie schon erwähnt, mit Z_1 bezeichnet werden, zum Unterschied von Z_2 (der zum Läufer gehörigen Drahtzahl einer Phase). In Fig. 170 stellt die stark ausgezogene Linie, beziehungsweise die von derselben begrenzte Fläché ein Maß für N_1 vor. Die Größen von N_1 und C_1 sind während eines Wechsels ganz bestimmten Schwankungen ausgesetzt, jedoch wird in der Praxis mit konstantem N_1 und C_1 gerechnet.

118. Drehmoment und Schlüpfung. [1]) Das Drehmoment, das der Motor entwickeln kann, ist immer dem Produkte Läuferfeld $\times$ Läuferstrom proportional. Wir können dasselbe jedoch auf einem anderen

[1]) Gisbert Kapp: Dynamomaschinen für Gleich- und Wechselstrom, 1899, Seite 418 ff.

Wege ermitteln, indem wir die Beziehungen zwischen dem Drehmoment und der zugeführten Leitung untersuchen: Sind die sekundlichen Umdrehungen des Läufers $\frac{n_2}{60}$, so beträgt die entsprechende sekundliche Periodenzahl $\sim_2$ (nicht zu verwechseln mit sekundlicher Periodenzahl des Läuferstromes) bei $2p$ Polen:

$$\sim_2 = \frac{p \cdot n_2}{60}.$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Läufers ergibt sich zu:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sim_2}{p}.$$

Bezeichnen wir das Drehmoment am Läufer mit T (in Meterkilogramm), so ist die mechanische Leistung in Sekundenmeterkilogramm:

$$\frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sim_2}{p}.$$

Die mechanische Leistung des Läufers beträgt daher in Watt ausgedrückt:

$$L_2' = \frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sim_2}{p} \cdot \frac{736}{75} = 61{\cdot}6\ T \cdot \frac{\sim_2}{p}. \quad 5)$$

Ist w_2 der Ohmsche Widerstand einer Läuferphase, so beträgt der Wattverlust im Läuferkupfer bei einem Strom i_2:

$$3 \cdot i_2{}^2 \cdot w_2.$$

Die dem Läufer zuzuführende Leistung sei L_2'' (in Watt) und wir erhalten:

$$L_2' = L_2'' - 3 \cdot i_2{}^2 \cdot w_2.$$

Indem wir mit L_2' die an der Welle abgegebenen Watt bezeichnen, läßt der zuletzt gefundene Ausdruck die Reibungs- und Eisenverluste unberücksichtigt, wie es auch den Kappschen Ausführungen entspricht. Aus Gleichung 5 folgt:

$$T = \frac{L_2' \cdot p}{61{\cdot}6 \cdot \sim_2}. \quad 6)$$

Setzen wir für L_2' den oben gefundenen Wert ein, so erhalten wir:

$$T = \frac{p}{61{\cdot}6 \cdot \sim_2} (L_2'' - 3 \cdot i_2{}^2 \cdot w_2). \quad 6\,a)$$

Sind die Umdrehungen des Drehfeldes in einer Sekunde $\frac{n_1}{60}$, so beträgt bei $2p$ Polen die primäre sekundliche Periodenzahl:

$$\sim_1 = \frac{p \cdot n_1}{60}.$$

Denken wir uns den Motor mit L_2' Watt belastet und vergrößern wir die Belastung, so verringern sich die Umdrehungen n_2. Wollen

wir, daß das die Läuferstäbe schneidende Feld bei dieser Belastungsvergrößerung konstant bleibe, so muß auch der dieses Feld beeinflussende Läuferstrom i_2 konstant bleiben. Da aber bei kleiner werdenden Umdrehungen n_2 die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Drehfeld und Anker, die $n_1 - n_2$ proportional ist (wobei n_1 konstant bleibt), größer wird, steigt i_2, da mehr Kraftlinien in der Zeiteinheit geschnitten werden. Denken wir uns jedoch einen regulierbaren Zusatzwiderstand W mit w_2 in Hintereinanderschaltung, so können wir durch richtige Wahl von W den Strom i_2 immer auf gleicher Höhe erhalten, und zwar auch dann, wenn wir den Anker festbremsen. Da wir auch dann dieselben Verhältnisse im Anker haben, besteht offenbar die Beziehung:

$$\frac{i_2\, w_2}{i_2\, (W + w_2)} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n}{n_1},$$

wenn wir $n_1 - n_2$ mit n bezeichnen.

$i_2\, w_2$ und $i_2\, (W + w_2)$ sind nichts anderes als die im Sekundärkreis auftretenden Spannungen, die ja bei gleichen Feldern sich wie n zu n_1 verhalten. Setzen wir statt $\frac{n}{n_1}$ den Wert $\frac{\sim}{\sim_1}$ ein, wobei $\sim = \sim_1 - \sim_2$ ist, so erhalten wir:

$$\frac{w_2}{W + w_2} = \frac{\sim}{\sim_1}. \quad 7)$$

Sowohl das Läuferfeld als auch der Läuferstrom sind von derselben Größe wie in dem Falle, in welchem nur w_2 im sekundären Kreise war, daher ist auch das Drehmoment, das Produkt aus Läuferfeld $\times$ Läuferstrom dasselbe geblieben. Die abgegebene Leistung ist aber, da der Läufer still steht (weil festgebremst), jetzt gleich Null. Die zugeführte Leistung ist dagegen, da die gleichen elektrischen Verhältnisse wie früher vorhanden sind, dieselbe geblieben. Es ist daher die früher nutzbar abgegebene Leistung im Zusatzwiderstand enthalten, das heißt:

$$L_2' = 3 \cdot i_2^2 \cdot W.$$

Aus 7 findet man:

$$\frac{\sim}{\sim_1} = \frac{w_2}{W + w_2} = \frac{3 \cdot i_2^2 \cdot w_2}{3 \cdot i_2^2 \cdot w_2 + 3 \cdot i_2^2 \cdot W},$$

oder, wenn man für $3 \cdot i_2^2 \cdot W$ den Wert L_2' einsetzt:

$$\frac{\sim}{\sim_1} = \frac{3 \cdot i_2^2 \cdot w_2}{3 \cdot i_2^2 \cdot w_2 + L_2'}. \quad 8)$$

Das Verhältnis $\frac{\sim}{\sim_1}$ nennen wir die Schlüpfung des Motors.

Die prozentuale Schlüpfung s ergibt sich dann zu:

$$s\,\% = 100 \cdot \frac{\sim}{\sim_1}.$$

Führen wir statt $\sim$ wieder die Bezeichnung $\sim = \sim_1 - \sim_2$ ein, so folgt aus 7:

$$(\sim_1 - \sim_2)(W + w_2) = \sim_1 w_2 \text{ oder}$$
$$\sim_1 W = \sim_2 (W + w_2) \text{ und}$$
$$\frac{\sim_2}{\sim_1} = \frac{W}{W + W_2}.$$

Da $L_2' = 3 \cdot i_2^2 \cdot W$ der abgegebenen Leistung und

$$L_2'' = 3 \cdot i_2^2 \cdot (W + w_2)$$

der zugeführten Leistung entspricht, können wir $\frac{\sim_2}{\sim_1}$ auch als Wirkungsgrad η_2 des Läufers ansehen.

Da ferner $\frac{\sim}{\sim_1} = 1 - \frac{\sim_2}{\sim_1}$ ist und wir $\frac{\sim_2}{\sim_1}$ mit η_2 bezeichnen wollen, können wir die prozentuale Schlüpfung $s\%$ auch schreiben:

$$s\% = 100 (1 - \eta_2), \quad 9)$$

wobei:

$$\eta_2 = \frac{\sim_2}{\sim_1} = \frac{L_2'}{L''}. \quad 10)$$

119. Magnetisierungsstrom und Leerstrom. Um den Magnetisierungsstrom berechnen zu können, müssen wir die Ampèrewindungen bestimmen, die nötig sind, um den Kraftlinienfluß durch den Ständer, den Luftspalt und den Läufer zu treiben und die Beziehung, die zwischen dem Magnetisierungsstrom und den Ampèrewindungen herrscht, feststellen.

Ist die Amplitude des Magnetisierungsstromes einer Phase J_m, so ist die Ampèrewindungszahl, die alle drei Phasen ausüben (Seite 145):

$$A\,W = \frac{3}{2} J_m \cdot \frac{Z_1}{2},$$

wenn Z_1 die Zahl der wirksamen Drähte einer Ständerphase bedeutet. Führen wir statt der Amplituden die Effektivwerte ein, so ist, da der Effektivwert $i_m = \frac{J_m}{\sqrt{2}}$ ist, die Ampèrewindungszahl des Ständers auch gleich:

$$A\,W = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot i_m \cdot \frac{Z_1}{2} = 2{\cdot}12 \cdot i_m \cdot \frac{Z_1}{2}. \quad 11)$$

Diese Formel ist, wie schon seinerzeit erwähnt, nicht genau, da sie, streng genommen, nur für eine ideale zweipolige Wicklung gilt. Aus Formel 11, die für alle $2\,p$ Pole des Motors gilt, ergibt sich die Ampèrewindungszahl eines Poles zu:

$$A\,W = \frac{2{\cdot}12 \cdot i_m \cdot Z_1}{4 \cdot p}, \quad 12)$$

wenn p die Zahl der Polpaare bedeutet.

Die erforderliche Ampèrewindungszahl, die nötig ist, um das Feld durch den magnetischen Kreis zu treiben, bestimmen wir aus den Sättigungen. Das Feld wird nicht genau den in Fig. 170 zur Darstellung gebrachten räumlichen Verlauf aufweisen. Die Ecken werden in Wirklichkeit abgerundet sein und das Feld beziehungsweise die Kurve desselben wird einen sinusförmigen Charakter annehmen. Für die Berechnung von $A\,W$ ist die mittlere Sättigung maßgebend. Niethammer[1]) gibt für i_m die Formel:

$$i_m = c_1 \cdot \frac{(A\,W \text{ pro Pol}) \cdot p}{Z_1}.$$

Dabei bedeutet $A\,W$ die Ampèrewindungszahl eines Drehfeldpoles, die aus der mittleren Induktion in den einzelnen Medien bestimmt wird. Als magnetische Weglängen sind die Längen der halben magnetischen Kreise einzusetzen. p ist die Zahl der Polpaare, Z_1 die Leiterzahl einer Phase, c_1 beträgt nach Niethammer 1·2 im Mittel und wurde aus Versuchen bestimmt.

Nach Formel 12 wäre:

$$i_m = \frac{4 \cdot A\,W \text{ (pro Pol)} \cdot p}{2{\cdot}12 \cdot Z_1} = \frac{1{\cdot}9 \cdot A\,W \cdot p}{Z_1}.$$

Der Koeffizient 2·12 wird bei mehrpoligen Maschinen erheblich größer. Aus Versuchen wurde ermittelt, daß man gute Übereinstimmung zwischen Vorausberechnung und Probe erzielt, wenn man setzt:

$$i_m = 1{\cdot}7 \cdot \frac{A\,W \text{ (pro Pol)} \cdot p}{Z_1}. \quad 13)$$

$A\,W$ bedeutet in Formel 13 ebenfalls die Ampèrewindungszahl eines Poles, berechnet aus den mittleren Sättigungen und den einfachen magnetischen Weglängen.

Nennen wir die Leerlaufswatt, die aus Eisenverlusten im Ständer und der Läuferreibungsarbeit bestehen V_{h+r}, so ergibt sich die Wattkomponente i_{w0}, Fig. 171, des Leerstromes i_0 pro Phase zu:

$$i_{w0} = \frac{V_{h+r}}{3 \cdot e_1}, \quad 14)$$

wenn wir von nun an mit e_1 immer die primäre Phasenspannung bezeichnen. i_{w0} hat als Wattstrom dieselbe Phase wie e_1. Die Kupferverluste können bei Leerlauf vernachlässigt werden, die Eisenverluste im Läufer sind, da die Schlüpfung sehr gering ist, ebenfalls ganz unwesentlich. Wir erhalten nun für den Leerstrom i_0, Fig. 171:

$$i_0 = \sqrt{i_m^2 + i_{w0}^2}. \quad 15)$$

---

[1]) **Niethammer: Handbuch der Elektrotechnik, Band IX, 1901, Seite 131.**

Die Eisenverluste bestehen aus Hysteresis- und Wirbelstromverlusten. Letztere, die unter anderem auch von der Blechstärke abhängig sind, werden in der Regel vernachlässigt. Die Hysteresisverluste bestimmen wir nach der Formel von Steinmetz zu:

$$V_h = \alpha \,.\, B_{1,\,max}^{\;1\cdot 6} \,.\, \sim_1 \,.\, V_1 \,.\, 10^{-7} \text{ Watt.} \qquad 16)$$

Darin bedeutet:

α den sogenannten Materialkoeffizienten, den wir mit 0·003 annehmen,

$B_{1,\,max}$ die maximale Induktion im Ständer (dem Scheitel der Feldkurve entsprechend); die Zähne und das Joch des Ständers sind, wenn die entsprechenden maximalen Induktionen verschieden sind, separat zu behandeln.

V_1 das Volumen des Ständerjochs und der Ständerzähne in cm^3,

$\sim_1$ die Periodenzahl des zugeführten Drehstromes.

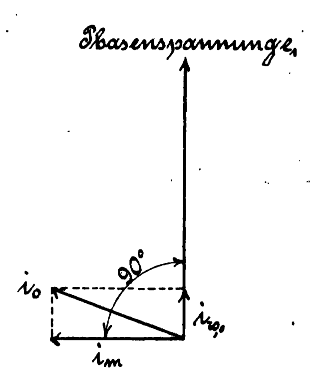


Fig. 171. Zeichnung der Wattkomponente u. s. w.

Streng genommen gilt Formel 16 nur für lineare Magnetisierungen und fallen die Verluste für drehende Magnetisierung, um die es sich hier handelt, im allgemeinen höher aus.

Um die gesamten Leerlaufswatt zu erhalten, können wir zu dem so gefundenen Werte der Eisenverluste noch 50% zuschlagen, um die Reibungsverluste zu berücksichtigen.

120. Primärstrom für Belastung, Läuferstrom und Kurzschlußstrom (primär), Leistungsfaktor bei normaler Belastung und bei Kurzschluß. Die Größe des Primärstromes einer Phase folgt, wenn wir die nützlich abgegebene Leistung (in Watt) mit L_2' bezeichnen, aus:

$$i_1 = \frac{L_2'}{\eta \,.\, 3 \,.\, e_1 \,.\, \cos\varphi_1}$$ für Motoren mit Sternschaltung und für Motoren mit Dreieckschaltung.

e_1 bedeutet dabei die primäre Spannung pro Phase,

η den Wirkungsgrad und $\cos\varphi_1$ den Leistungsfaktor des Motors.

Da wir $\cos\varphi_1$ und η nicht kennen, halten wir uns, da wir es vermeiden wollen, diese beiden Größen schätzungsweise anzunehmen, im folgenden an die Ausführungen von Weißhaar[1]) und ziehen wieder das Heylandsche Diagramm zu Rate.

[1]) Weißhaar: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, Seite 943.

Wir bezeichneten schon mit:

i_0 den Leerstrom,

i_{w0} die Wattkomponente desselben und mit

$i_m = \sqrt{i_0^2 - i_{w0}^2}$ den Magnetisierungsstrom.

Ist wieder w_2 der Ohmsche Widerstand des Läufers einer Phase und w_1 der Ohmsche Widerstand des Ständers einer Phase, so ist bei bekanntem τ_1 und τ_2 eine vollkommen eindeutige Bestimmung aller interessierenden Größen möglich.

Um die Rechnung zu vereinfachen, wird der wirkliche Läuferwiderstand w_2 auf die Ständergrößen reduziert und wir erhalten den sogenannten äquivalenten Läuferwiderstand:

$$w_2' = w_2 \cdot \left[\frac{Z_1}{Z_2} \cdot (1 + \tau_1)\right]^2. \quad 17)$$

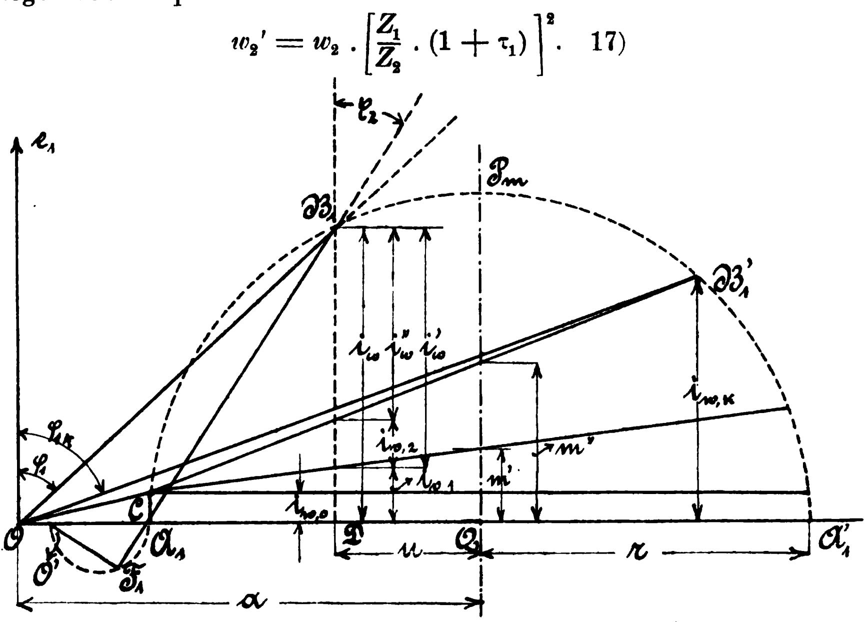


Fig. 172. Berechnung der Verhältnisse im Läufer.

Z_1 bedeutet die primäre Drahtzahl, Z_2 die sekundäre Drahtzahl. Alle Größen sind immer für eine Phase zu verstehen. Nach den ausführlichen Erörterungen bei der Herleitung des Diagrammes PS ist:

$$\tau_1 = \frac{\text{magnetischer Widerstand des Luftfeldes}}{\text{magnetischer Widerstand des Ständerstreufeldes}}$$

und analog war:

$$\tau_2 = \frac{\text{magnetischer Widerstand des Luftfeldes}}{\text{magnetischer Widerstand des Läuferstreufeldes}}.$$

Die Verhältnisse im Läufer berechnen wir unter zu grunde gelegter Diagrammgröße $\overline{A_1 B_1}$, Fig. 172, die wir i_2 nennen. Da der

wirkliche Läuferstrom i_2', wenn $Z_1 = Z$ wäre, durch die Strecke $\overline{B_1 F_1}$ dargestellt würde, ist $\overline{A_1 B_1} = \frac{i_2'}{1 + \tau_1}$, wie schon aus der Gleichung (1, Seite 206) hervorgeht. Da Ständer und Läuferdrahtzahl einer Phase nicht gleich sind, ist:

$$i_2'' = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot i_2';$$

i_2'' ist dann der Läuferstrom, den wir messen würden, wenn wir in eine Läuferphase einen Stromzeiger einschalten würden. Um nun eine wirkliche Verlustgröße $i_2''^2 \cdot w_2$ im Läufer auf die Diagrammgröße $i_2 = \overline{A_1 B_1} = \frac{i_2'}{1 + \tau_1}$ beziehen zu können, schreiben wir:

$$i_2''^2 \cdot w_2 = i_2^2 \cdot w_2' \text{ oder}$$

$$\left(i_2' \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \cdot w_2 = i_2^2 \cdot w_2'.$$

Setzen wir statt $i_2' = i_2 (1 + \tau_1)$ ein, so erhalten wir:

$$i_2^2 \cdot \left[\frac{Z_1}{Z_2} (1 + \tau_1)\right]^2 \cdot w_2 = i_2^2 \cdot w_2', \text{ d. h.:}$$

$$w_2' = w_2 \cdot \left[\frac{Z_1}{Z_2} \cdot (1 + \tau_1)\right]^2$$

wie Gleichung 17 besagt.

Nur durch Einführung dieses sogenannten äquivalenten Sekundärwiderstandes w_2' wird es uns ermöglicht, die Verhältnisse im Läufer mit der Diagrammgröße $\overline{A_1 B_1} = i_2$ in Beziehung zu bringen.

Alle auftretenden Verlustgrößen werden in Form von Wattströmen ausgedrückt und führen wir noch die Bezeichnungen: $c_1 = \frac{w_1}{e_1}$ und $c_2 = \frac{w_2'}{e_1}$ ein. e_1 ist dabei die primäre Phasenspannung.

Aus dem Wattstrom, welcher der nutzbar abgegebenen Leistung entspricht, erhalten wir die nutzbar abgegebenen PS, indem wir denselben mit $c = \frac{3\, e_1}{736}$ multiplizieren. Wäre dieser Wattstrom i_w'', so ist ja $3\, i_w''\, e_1$ die abgegebene Leistung in Watt und: $\frac{3 \cdot i_w'' \cdot e_1}{736}$ die entsprechende Nutzleistung in PS; folglich ist $c \cdot i_w'' =$ nutzbare PS, da auch alle Wattströme für eine Phase zu verstehen sind.

In Fig. 172 sei:

$\overline{O A_1} = i_m$, der Magnetisierungsstrom.

$\overline{A_1 C} = i_{w0}$, die Wattkomponente des Leerstromes.

$$\frac{\overline{O A_1}}{\overline{A_1' A_1}} = \tau = \frac{i_m}{2\, r}. \quad 18)$$

τ ist gleich $\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2$ und $2\,r$ bedeutet den Durchmesser des Diagrammkreises. Wir bezeichnen ferner $\overline{O\,O_1}$ mit a und haben $a = i_m + r$.

$\overline{B_1\,D}$, Fig. 172, $= i_w$ sei der Wattstrom, der einem beliebigen Belastungszustand entspricht. Die in den Motor eingeleiteten Watt ergeben sich dann zu:

$$\text{Eingeleitete Watt} = 3 \,.\, i_w \,.\, e_1 .$$

Die Strecke $\overline{O_1\,D}$ nennen wir u und wir erhalten:

$$u = \sqrt{r^2 - i_w^2}. \quad 19)$$

Die Strecke $O\,B_1$ stellt den zugehörigen Primärstrom i_1 dar.

Aus dem Diagramm, Fig. 172, folgt:

$$\frac{\overline{O\,D}}{\overline{B_1\,D}} = \frac{a \mp u}{i_w} = tg\,\varphi_1, \quad 20\,a)$$

$$\frac{\overline{A_1\,D}}{\overline{B_1\,D}} = \frac{r \mp u}{i_w} = tg\,\varphi_2. \quad 20\,b)$$

Dabei gilt das negative Vorzeichen für Belastungspunkte, die von A_1 bis P_m liegen; von P_m nach rechts gilt das positive Vorzeichen.

Aus Gleichung 20 a und 20 b erhält man:

$$\cos\varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\,\varphi_1}}. \quad 21\,a)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\,\varphi_2}}. \quad 21\,b)$$

Aus dem Diagramm, Fig. 172, ist zu entnehmen:

$$i_1 = \frac{i_w}{\cos\varphi_1} \text{ und } i_2 = \frac{i_w}{\cos\varphi_2}. \quad 22\,a) \text{ und } 22\,b)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 20 a, b und 21 a, b in Gleichung 22 a, b erhält man:

$$i_1 = \sqrt{a^2 + r^2 \mp 2 \,.\, a \,.\, u} \text{ und } i_2 = \sqrt{2 \,.\, r^2 \mp 2\,r \,.\, u}. \quad 23\,a) \text{ und } 23\,b)$$

Die Verluste werden als Wattströme (Ströme in Phase mit der Spannung e_1) betrachtet. Die Ständerverluste i_{v_1} haben, als Wattströme betrachtet, die Form:

$$i_{v_1} = i_1^{\,2} \,.\, c_1 + i_{w0} = (a^2 + r^2 \mp 2\,a \,.\, u) \,.\, c_1 + i_{w0};$$

entsprechend den primären Kupfer- und den Leerlaufverlusten.

Analog erhält man für die Läuferverluste:

$$i_{v_2} = i_2^{\,2} \,.\, c_2 = (2\,r^2 \mp 2\,r \,.\, u) \,.\, c_2;$$

entsprechend der sekundären Kupferwärme.

In Fig. 172 sind diese Größen eingetragen.

Wir bezeichnen nun mit i_w'' die Wattkomponente, die der abgegebenen Nutzleistung entspricht, und mit i_w' die Wattkomponente, die sich aus i_w (der Wattkomponente der dem Ständer zugeführten

Leistung) weniger der Wattkomponente der Ständerverluste ergibt. i_w' entspricht, da es die Läuferverluste noch enthält, nach Formel 8 dem Nenner des dort angeführten Bruches, d. h. der auf den Läufer übertragenen Arbeit L_2''. Nach Gleichung 10 ist:

$$L_2' = L_2'' \cdot \frac{\backsim_2}{\backsim_1}.$$

Setzen wir diesen Ausdruck in Gleichung 6 ein, so wird das Drehmoment T gleich:

$$T = \frac{p \cdot L_2''}{61{\cdot}6 \; \backsim_1}.$$

Da p und $\backsim_1$ konstante Größen sind, ist daher das Drehmoment proportional L_2'' und daher auch proportional i_w'. Die absolute Größe von T ergibt sich dann bei bekanntem i_w' zu:

$$T = \frac{p \cdot 3 \cdot i_w' \cdot e_1}{61{\cdot}6 \cdot \backsim_1}.$$

Die Größen i_w, i_w' und i_w'' beziehen sich auf den beliebig gewählten Punkt B_1. Wir erhalten daher auf Grund unserer Definitionen:

$$i_w' = i_w - i_{v1} = i_w - (a^2 + r^2 \mp 2 \cdot a \cdot u) \cdot c_1 - i_{w0}$$

$$i_w'' = i_w' - i_{v2} = i_w \, (a^2 + r^2 \mp 2 \cdot a \cdot u) \cdot c_1 - i_{w0} - (2 \, r^2 \mp 2 \, r \cdot u) \cdot c_2.$$

Eine einfache Umformung führt zu:

$$i_w' = i_w - [(a^2 + r^2) \cdot c_1 + i_{\ 0}] \mp 2 \cdot a \cdot u \cdot c_1, \quad 24\,a)$$

$$i_w'' = i_w - [(a^2 + r^2) \cdot c_1 + i_{w0} + 2 \, r^2 \cdot c_2] \pm (2 \cdot a \cdot c_1 + 2 \cdot r \cdot c_2) \cdot u. \; 24\,b).$$

Die Größen:

$$(a^2 + r^2) \cdot c_1 + i_{w0} = m',$$

$$2 \cdot a \cdot c_1 = n',$$

$$(a^2 + r^2) \cdot c_1 + i_{w0} + 2 \cdot r^2 \cdot c_2 = m'' \text{ und}$$

$$2 \cdot a \cdot c_1 + 2 \cdot r \cdot c_2 = n'',$$

lassen sich von vornherein aus den Eisen- und Kupferabmessungen berechnen und sind, da sie nur das Verhältnis

$$\frac{\text{Widerstände}}{\text{Konstante Phasenspannung}} \; (c_1 \text{ und } c_2),$$

die Wattkomponente des Leerstromes und die lediglich von τ abhängigen Beziehungen zwischen a und r enthalten, unabhängig von der Belastung. Nur ist zu berücksichtigen, daß die Widerstände w_1 und w_2 so bestimmt werden müssen, daß man der Widerstandszunahme durch Erwärmung (bei Belastung) Rechnung trägt. Man berücksichtigt diesen Umstand am besten dadurch, daß man die Leitungsfähigkeit k des Kupfers mit $k = 50$ einsetzt. Lassen wir in Gleichung 24 a und 24 b u Null werden, d. h. betrachten wir den Belastungspunkt P_m in Fig. 172, so erkennen wir aus genannter Gleichung, daß m' nichts anderes bedeutet als den Wattstrom, der im Punkte P_m den Ständerverlusten ent-

spricht. m stellt daher, da in Gleichung 24 b bei $u =$ Null noch die Läuferverluste $2 \,.\, r^2 \,.\, c_2$ im Klammerausdruck stehen, den Wattstrom dar, der den gesamten Motorverlusten im Punkt P_m entspricht.

Wir schreiben nun Gleichung 24 a und 24 b in der Form:

$$i_w' = i_w - m' \pm n' \,.\, u, \quad 25\ a)$$

$$i_w'' = i_w - m'' \pm n'' \,.\, u. \quad 25\ b)$$

Durch Auflösen der Formel 25 a nach i_w erhalten wir:

$$i_w = i_w' + m' \mp n' \,.\, u.$$

Für $u = \sqrt{r^2 - i_w^2}$ eingesetzt und umgeformt, erhält man:

$$i_w - i_w' - m' = \mp n' \sqrt{r^2 - i_w^2}.$$

Quadrieren wir beide Seiten der zuletzt erhaltenen Gleichung, so wird:

$$i_w^2 - 2\, i_w\, i_w' + i_w'^2 + m'^2 - 2\, i_w\, m' + 2\, i_w'\, m' = n'^2 \,.\, r^2 - n'^2 \,.\, i_w^2$$

$$i_w^2 (1 + n'^2) - 2\, i_w (i_w' + m') = n'^2 \,.\, r^2 - (i_w' + m')^2.$$

Lösen wir diese quadratische Gleichung nach i_w auf, so bekommen wir:

$$i_w = + \frac{i_w' + m'}{1 + n'^2} \mp \sqrt{\frac{(i_w' + m')^2 + (1 + n'^2)\,(n'^2\, r^2 - [i_w' + m']^2)}{(1 + n'^2)^2}}$$

oder $$i_w = \frac{i_w' + m' \mp n' \,.\, \sqrt{r^2 (1 + n'^2) - (i_w' + m')^2}}{1 + n'^2} \quad 26\ a)$$

Analog erhält man aus 25 b:

$$i_w = \frac{i_w'' + m'' \mp n'' \sqrt{r^2 (1 + n''^2) - (i_w'' + m'')^2}}{1 + n''^2} \quad 26\ b)$$

i_w'' entspricht, wie bereits betont, der abgegebenen Leistung in *PS*. Da die abzugebenden *PS* immer bekannt sind, ist $i_w'' = \frac{L'_2}{c}$ immer gegeben. c ist dabei $\frac{3\, e_1}{736}$. Hat man einmal die Eisendimensionen und Wicklungsdaten festgelegt, so ermittelt sich nunmehr der genaue Wert von i_w für die normale Belastung aus Gleichung 26 b. Unter Zuhülfenahme von Gleichung 19 bestimmt man daraus u und erhält nunmehr aus den Gleichungen 20 a, 21 a und 22 a den richtigen Wert des Primärstromes i_1, ohne von einer Schätzung von η und $\cos \varphi_1$ abhängig zu sein.

Aus Gleichung 21 a, b folgt bei bekanntem u (durch Benutzung von Gleichung 20 a, b auch sofort der Leistungsfaktor $\cos \varphi_1$ und die Größe $\cos \varphi_2$.

Der Läuferstrom i_2'', der wirklich gemessen wird, folgt aus:

$$i_2'' = i_2\, (1 + \tau_1) \,.\, \frac{Z_1}{Z_2}.$$

Indem wir für $i_2 = \frac{i_w}{\cos\varphi_2}$ setzen, erhalten wir:

$$i_2'' = \frac{i_w}{\cos\varphi_2} \cdot (1 + \tau_1) \cdot \frac{Z_1}{Z_2}. \quad 27)$$

Dabei geht $\cos\varphi_2$, wie schon erwähnt, unter Einsetzung von u aus Gleichung 21 b hervor. Der Punkt, in welchem $i_w'' =$ Null oder nach Gleichung 25 b:

$$i_w = m'' \mp n'' u$$

wird, ist der Kurzschlußpunkt des Motors.

Nennen wir den diesem Punkt entsprechenden Wattstrom $i_{w\,k}$, so ist:

$$i_{w\,k} = m'' + n'' u = m'' + n'' \sqrt{r^2 - i_{w\,k}^2}.$$

Wir schreiben, da der Kurzschlußpunkt rechts von P_m am Kreisbogen liegt, nur das positive Vorzeichen an. Wir formen nun die zuletzt gefundene Gleichung ähnlich um wie Gleichung 25 a und erhalten:

$$i_{w\,k} = \frac{m'' + n'' \sqrt{r^2 (1 + n''^2) - m''^2}}{1 + n''^2}. \quad 28)$$

Aus Fig. 172 entnehmen wir sofort:

$$tg\,\varphi_{1k} = \frac{a + \sqrt{r^2 - i^2_{w\,k}}}{i_{w\,k}}. \quad 29)$$

Wir erhalten nun für:

$$\cos\varphi_{1k} = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\,\varphi_{1k}}} \quad 30)$$

und für den Kurzschlußstrom (primär):

$$i_{1k} = \frac{i_{w\,k}}{\cos\varphi_{1k}}. \quad 31)$$

121. Wirkungsgrad und Schlüpfung. Die Schlüpfung wurde wohl bereits festgelegt, wir wollen jedoch hier noch einmal auf dieselbe zurückkommen.

i_w ist der zugeführte Wattstrom, folglich stellt $i_w \cdot c \left(c = \frac{3\,e_1}{736}\right)$ die zugeführten *PS* dar. i_w' ist der Wattstrom, der um den Wattstrom der Ständerverluste kleiner ist als i_w. Wir können daher $\frac{i_w'}{i_w}$ den Wirkungsgrad des Ständers nennen und schreiben:

$$\frac{i_w'}{i_w} = \eta_1 = \text{Nutzeffekt des Ständers.} \quad 32\,a)$$

Analog erhalten wir: $\frac{i_w''}{i_w'} = \eta_2 =$ Nutzeffekt des Läufers. $\quad$ 32 b)

$$\eta_1 \cdot \eta_2 = \frac{i_w''}{i_w} = \eta \text{ Nutzeffekt des Motors.} \quad 32\,c)$$

Nach Gleichung 9 hatten wir für die prozentuale Schlüpfung:

$$s\% = 100\,(1 - \eta_2),$$

können also dieselbe auch darstellen durch:

$$s\% = 100\left(1 - \frac{i_w''}{i_w'}\right) \quad 33.$$

Der absolute Wert von i_w wird immer aus Gleichung 26 *b* bestimmt, in welcher alle Größen bekannt sind, da sich i_w'' aus

$$\frac{\text{abgegebene } PS}{c}$$

ergibt. i_w' wird dann durch Einsetzen des nunmehr bekannten i_w in Gleichung 25 *a* ermittelt. Im folgenden führen wir ein Beispiel durch, um die praktische Anwendung der gefundenen Formeln und des Diagrammes von Heyland vor Augen zu führen.

V. Kapitel.

Berechnung eines Drehstrommotors.

122. Angaben. Gegeben sei:
Leistung $L_2 = 12$ *PS*.
Sekundliche Periodenzahl des zugeführten Stromes $\sim_1 = 50$.
Polzahl $2\,p = 6$.
Verkettete Spannung $e = 110$ Volt.
Phasenspannung $e_1 = \frac{110}{\sqrt{3}} = 63{\cdot}6$ Volt.

Aus diesen Angaben folgt die synchrone Umdrehungszahl n_1 zu:

$$n_1 = \frac{60\,.\sim_1}{p} = \frac{60\ \ 50}{3} = 1000 \text{ Umdrehungen in der Minute.}$$

123. Berechnung des Ständers. Setzen wir nach Gleichung 1: $PS = C\,.\,D^2_{1i}\,.\,l\,.\,n_1\,.\,10^{-6}$ und wählen für $C = 1{\cdot}0$, so erhalten wir

$$D^2_{1i}\,.\,l = \frac{PS\,.\,10^6}{1{\cdot}0\,.\,1000} = 12000\ cm^3.$$

Die übliche Umfangsgeschwindigkeit v des Läufers beträgt 15 bis 25 *m* in der Sekunde. Entscheiden wir uns für $v = 18\ m$, so erhalten wir aus:

$$v = \frac{\pi\,.\,D_{1i}\,.\,n_1}{60} \text{ den Durchmesser:}$$

$$D_{1i} = \frac{60\,.\,v}{\pi\,.\,n_1} = \frac{60\,.\,18}{\pi\,.\,1000} \cong 0{\cdot}34\ m.$$

Wir führen D_{1i} mit 34 *cm* aus und erhalten für die Ständerbreite l (gleich der Läuferbreite):

$$l = \frac{12000}{34^2} \cong 10 \; cm.$$

Entscheiden wir uns für 2 Nuten pro Pol und Phase des Ständers, so beträgt die gesamte Nutenzahl des Ständers:

$$N_1 = 6 \,.\, 3 \,.\, 2 = 36.$$

Bei 6 Polen und $D_{1i} = 340 \; mm$ erhalten wir eine Polteilung τ_p von:

$\tau_p = \frac{340 \,.\, \pi}{6} = 178 \; mm$; auf diese Teilung entfallen 6 Zähne und 6 Nuten. Wählen wir vorläufig Zahn- und Nutenbreite gleich, so bleiben für 6 Nuten $\frac{178}{2} \cong 90 \; mm$, d. h. pro Nut 15 *mm* Breite. Es ist üblich, mit der mittleren Luftsättigung, die wir mit B_l mittl. bezeichnen wollen, bis zu B_l mittl. $= 3000$ zu gehen.

Der Luftquerschnitt Q_l ergibt sich zu:

$$Q_l = \tau_p \,.\, l = 17{\cdot}8 \; cm \,.\, 10 \; cm = 178 \; cm^2.$$

Das Luftfeld N_l folgt daraus zu:

$$N_l = Q_l \,.\, B_l \text{ mittl.} = 178 \,.\, 3000 = 0{\cdot}534 \,.\, 10^6 \text{ pro Pol.}$$

Das Ständerfeld N_1 ist etwas größer und verfahren wir genau genug, wenn wir $N_1 = 1{\cdot}05 \, N_l$ setzen. Bei bekanntem τ_1 und τ_2 läßt sich N_1 genauer ermitteln, jedoch begnügen wir uns mit unserer Annahme. Schätzen wir vorläufig die *E M K* des Ständers auf 60 Volt (in einer Phase), so erhalten wir aus Formel 4 die wirksame Leiterzahl Z_1 (in einer Phase) zu:

$$Z_1 = \frac{e_1' \,.\, 10^8}{2{\cdot}1 \,.\, \sim_1 \,.\, N_1} = \frac{60 \,.\, 10^8}{2{\cdot}1 \,.\, 50 \,.\, (1{\cdot}05 \,.\, 0{\cdot}534 \,.\, 10^6)} = 102.$$

Da wir in einer Phase $\frac{36}{3} = 12$ Nuten haben, nehmen wir:

$\frac{102}{12} = 8{\cdot}5$, beziehungsweise 9 wirksame Drähte in einer Nut an und erhalten für $Z_1 = 9 \,.\, 12 = 108$.

Der Primärstrom i_1 in einer Phase kann vorläufig nur angenähert bestimmt werden. Wir haben, wenn wir den Ständer in Sternschaltung ausführen,

$$i_1 = \frac{L_2}{\eta} \,.\, \frac{736}{110 \,.\, \sqrt{3} \,.\, \cos \varphi_1}.$$

Wir nehmen den Wirkungsgrad vorläufig mit 0·85 und $\cos \varphi_1$ mit 0·86 an. Daraus folgt i_1 zu:

$$i_1 = \frac{12 \; PS \,.\, 736}{0{\cdot}85 \,.\, 110 \,.\, \sqrt{3} \,.\, 0{\cdot}86} = 63{\cdot}5 \text{ Ampère.}$$

Bei einer Stromdichte von 2·3 Ampère pro mm^2 erhalten wir nunmehr einen Querschnitt des Ständerkupfers von:

$$q_1 = \frac{63 \cdot 5}{2 \cdot 3} = 27 \cdot 6 \; mm^2.$$

Da sich der diesem Querschnitt entsprechende Draht kaum wickeln läßt, nehmen wir für jeden wirksamen Leiter zwei parallel geschaltete Drähte vom Querschnitt $\frac{q_1}{2}$.

Wir entscheiden uns für $\frac{q_1}{2} = 12 \cdot 56 \; mm^2$ und nehmen dementsprechend 2 . 9 = 18 Drähte von 4 *mm* Durchmesser (blank) in einer Nut. Von diesen 18 Drähten sind infolge der Parallelschaltung nur 9 wirksam. Legen wir in jede Nut drei Drähte nebeneinander und sechs Drähte übereinander, so erhalten wir für die Nutenbreite β_1, wenn der umsponnene Draht 4·5 *mm* Φ erhält:

$$\beta_1 = 3 \, . \, 4 \cdot 5 \; mm + 2 \cdot 5 \; mm = 16 \; mm.$$

Der Zuschlag von 2·5 *mm* ist für die Isolation des umsponnenen Drahtes vom Eisenkörper des Ständers nötig.

Ähnlich erhält man für die Nutentiefe:

$$\gamma_1 = 6 \, . \, 4 \cdot 5 \; mm + 7 \; mm = 34 \; mm.$$

Wir rechtfertigen den Zuschlag von 7 *mm* damit, daß wir 3 *mm* für die Isolation der Wicklung vom Eisenkörper annehmen und 3·0 *mm* für einen in die Nut zuschiebenden Keil, der die Wicklung festhält, vorsehen. Dieser Keil wird aus Holz angefertigt. Es bleibt dann noch 1 *mm* frei und hat die fertige Nut die Form, die in Fig. 173 zur Darstellung gebracht ist.

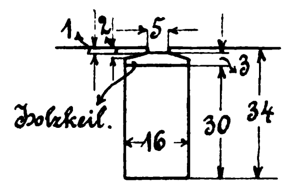


Fig. 173. Ständernut.

Wir rechnen nun, da die Zahl der wirksamen Drähte Z_1 von 102 auf 108 abgerundet wurde, das genaue Ständerfeld N_1 nach und berücksichtigen jetzt den Spannungsabfall ε_1 einer Phase genauer.

Nach Fig. 174 ergibt sich die mittlere Länge eines Ständerdrahtes zu:

$$l_{m1} = 0 \cdot 38 \; m.$$

Die gesamte Drahtlänge der wirksamen Drähte Z_1 ergibt sich daher zu:

$$l_{g1} = Z_1 \, . \, 0 \cdot 38 = 108 \, . \, 0 \cdot 38 = 41 \; m.$$

Der Ohmsche Widerstand w_1 der Ständerwicklung einer Phase beträgt daher:

$$w_1 = \frac{l_{g1}}{K \,.\, q_s} = \frac{41}{50 \,.\, 2 \,.\, 12{\cdot}56} = 0{\cdot}0326 \text{ Ohm.}$$

K bedeutet darin die Leitungsfähigkeit des Kupfers im warmen Zustande und wird allgemein mit 50 angenommen.

Bei einem Strom $i_1 = 63{\cdot}5$ Ampère in einer Phase erhalten wir:

$$\varepsilon_1 = i_1 \,.\, w_1 = 63{\cdot}5 \,.\, 0{\cdot}0326 \cong 2{\cdot}1 \text{ Volt.}$$

Die EMK e_1' einer Phase ergibt sich dann nach Fig. 175 zu:

$$e_1' = \sqrt{e_1{}^2 + \varepsilon_1{}^2 - 2\, e_1\, \varepsilon \,.\, \cos \varphi_1} =$$
$$= \sqrt{63{\cdot}6^2 + 2{\cdot}1^2 - 2 \,.\, 63{\cdot}5 \,.\, 2{\cdot}1 \,.\, 0{\cdot}86} = 61{\cdot}7 \text{ Volt.}$$

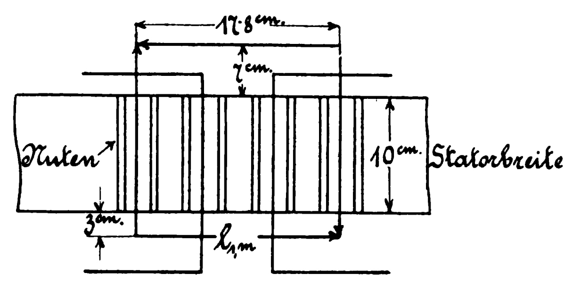


Fig. 174. Mittlere Länge eines Ständerdrahtes.

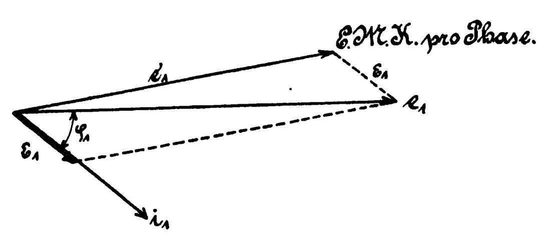


Fig. 175. *EMK* einer Phase.

Das richtige Ständerfeld N_1 folgt nun aus:

$$N_1 = \frac{e_1' \,.\, 10^8}{2{\cdot}1 \,.\, \sim_1 \,.\, Z_1} = \frac{61{\cdot}7 \,.\, 10^8}{2{\cdot}1 \,.\, 50 \,.\, 108} = 0{\cdot}545 \,.\, 10^6 \text{ für einen Pol.}$$

Für das Luftfeld erhalten wir nach vorigem:

$$N_l = \frac{N_1}{1{\cdot}05} = \frac{0{\cdot}545}{1{\cdot}05} = 0{\cdot}52 \,.\, 10^6.$$

Um die Sättigung in den Ständerzähnen ermitteln zu können berechnen wir zunächst den Ständerzahnquerschnitt. Derselbe ergibt sich aus dem Produkt:

Zahnzahl pro Pol $\times$ wirksame Ständerbreite $\times$ Zahnbreite pro Zahn.

Es kommen wegen der Verschiedenheit der Durchmesser D_1' und D_1'', Fig. 176, zwei Zahnbreiten in Betracht, wenn wir die Zahnstege außer acht lassen.

Wir erhalten für die Zahnbreite ϑ_1' in *cm*:

$$\vartheta_1' = \frac{D_1' \,.\, \pi}{N_1} - 1{\cdot}6 \; cm = \frac{34{\cdot}4 \,.\, \pi}{36} - 1{\cdot}6 = 1{\cdot}4 \; cm$$

und analog für

$$\vartheta_1'' = \frac{D_1'' \,.\, \pi}{N_1} - 1{\cdot}6 = \frac{40{\cdot}8 \,.\, \pi}{36} - 1{\cdot}6 = 1{\cdot}96 \; cm.$$

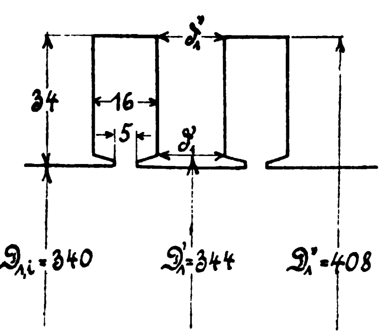


Fig. 176. Zahnbreite.

Da wir mit verhältnismäßig niedrigen Sättigungen arbeiten, können wir der Berechnung, ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen, eine mittlere Zahnbreite ϑ' zu grunde legen. Der mittlere Zahnquerschnitt $Q_{1,z}$ der Ständerzähne ergibt sich dann zu:

$$Q_{1,z} = \frac{N_1}{2 \,.\, p} \,.\, l_w \,.\, \frac{\vartheta_1' + \vartheta_1''}{2} = \frac{36}{6} \,.\, (0{\cdot}9 \,.\, 10) \,.\, \frac{1{\cdot}4 + 1{\cdot}96}{2} = 91 \; cm^2.$$

l_w bedeutet dabei die wirksame Ständerbreite, die wir, da durch Isolation der einzelnen Bleche untereinander eine Verminderung des nützlichen Eisenquerschnittes stattfindet, mit $l_w = 0{\cdot}9 \; l$ ansetzen.

Die mittlere Zahnsättigung $B_{1,z}$ mittl. der Ständerzähne ergibt sich nun zu:

$$B_{1,z} \, \text{mittl.} = \frac{N_1}{Q_{1,z}} = \frac{0{\cdot}545 \,.\, 10^6}{91} = 6{\cdot}0 \,.\, 10^3.$$

Daraus folgt die maximale Sättigung $B_{1,z} \, max$ der Ständerzähne, wenn wir uns den in Fig. 170 zur Darstellung gebrachten Kraftlinienverlauf in Form einer Sinuslinie erfolgt denken, zu:

$$B_{1,z} \, max = B_{1,z} \, \text{mittl.} \,.\, \frac{\pi}{2} = 9{\cdot}4 \,.\, 10^3,$$

ein Wert, der praktisch üblich ist.

Für die mittlere Luftsättigung erhalten wir nunmehr:

$$B_l \text{ mittl.} = \frac{N_l}{Q} = \frac{0{\cdot}52 \,.\, 10^6}{178} = 2{\cdot}92 \,.\, 10^3.$$

Da die Nuten des Ständers halb offen sind, wird der Luftquerschnitt in Wirklichkeit etwas kleiner ausfallen, weil nicht die ganze Polteilung τ_p in die Berechnung desselben einzusetzen ist. Die genaue Größe dieses Querschnittes wäre auch von der Anordnung der Läuferzähne abhängig zu machen. Wir begnügen uns jedoch damit, diesen Querschnitt so zu bestimmen, daß wir statt der Polteilung τ_p die Größe $\tau_p - \sigma_1 \,.\, \frac{N_1}{2p}$ einführen; diese Größe nennen wir τ_p' und stellt dieselbe die Polteilung, vermindert um die Strecke, die den sechs Schlitzbreiten σ_1 des Ständers für einen Pol entspricht, dar.

Wir erhalten für:

$$\tau_p' = \tau_p - \sigma_1 \,.\, \frac{N_1}{2p} = 178 - 5 \,.\, \frac{36}{6} = 148 \; mm$$

und der nunmehrige Luftquerschnitt Q_l ergibt sich zu:

$$Q_l = \tau_p' \,.\, l = 14{\cdot}8 \,.\, 10 = 148 \; cm^2.$$

Wir erhalten daher für:

$$B_l \text{ mittl.} = \frac{0{\cdot}52 \,.\, 10^6}{148} = 3{\cdot}5 \,.\, 10^3.$$

Wählen wir die mittlere Jochsättigung des Ständerjoches

$$B_{1,\,j} \text{ mittl.} = B_{1,\,z} \text{ mittl.} = 6{\cdot}0 \,.\, 10^3,$$

so wird der erforderliche Jochquerschnitt:

$$Q_{1,\,j} = \frac{N_1}{B_{1,\,j} \text{ mittl.}} = \frac{0{\cdot}545 \,.\, 10^6}{6{\cdot}0 \,.\, 10^3} \cong 90 \; cm^2.$$

Da jedoch der zu einem Pol gehörige Jochquerschnitt nur $\frac{N_1}{2}$ Kraftlinien zu leiten hat, erhalten wir für den Jochquerschnitt pro Pol $\frac{90}{2} = 45 \; cm^2$. Die wirksame Eisenbreite l_w war nach Abzug der Isolation der Bleche 9 cm. Es ergibt sich daher für die radiale Jochtiefe j, Fig. 177, $\frac{45}{9} = 5 \; cm$. Mithin wird der äußere Ständerdurchmesser:

$$D_{1,\,a} = D_1'' + 2 \,.\, 50 \; mm = 508 \; mm.$$

Berechnung der Verluste im Ständer.

Da wir in den Zähnen und im Joch dieselbe mittlere Sättigung haben, können die Verluste gemeinsam berechnet werden. Das Volumen der Ständerzähne $V_{1,\,z}$ beträgt:

$$J_{1,\,z} = N_1 \,.\, l_w \,.\, \frac{\vartheta_1' + \vartheta_1''}{2} \,.\, \gamma_1 = 36 \,.\, 9 \,.\, 1{\cdot}68 \,.\, 3{\cdot}4 = 1850 \; cm^3,$$

rund 2000 cm^3, wenn wir die Zahnstege berücksichtigen.

Das Jochvolumen $J_{1,j}$ findet sich zu:

$$J_{1,j} = \frac{\pi}{4} (D_{1,a}^2 - D_1''^2) \,.\, l_w = \frac{\pi}{4} (\overline{50{\cdot}8}^2 - \overline{40{\cdot}8}^2) \,.\, 9 = 6400 \; cm^3.$$

Nach Formel 16 erhalten wir daher einen Hysteresisverlust von

$$V_h = 0{\cdot}003 \,.\, \left(6{\cdot}0 \,.\, \frac{\pi}{2}\right)^{1,6} .\, 50 \,.\, (6400 + 2000) \,.\, 10^{-7} = 450 \text{ Watt.}$$

Die Kupferverluste bestimmen sich bei $i_1 = 63{\cdot}5$ Ampère zu

$$V_{cu_1} = 3 \,.\, i_1^2 \,.\, w_1 = 3 \,.\, \overline{63{\cdot}5}^2 \,.\, 0{\cdot}0326 = 395 \text{ Watt.}$$

Die Summe der Verluste im Ständer beträgt demnach:

$$450 + 395 = 845 \text{ Watt.}$$

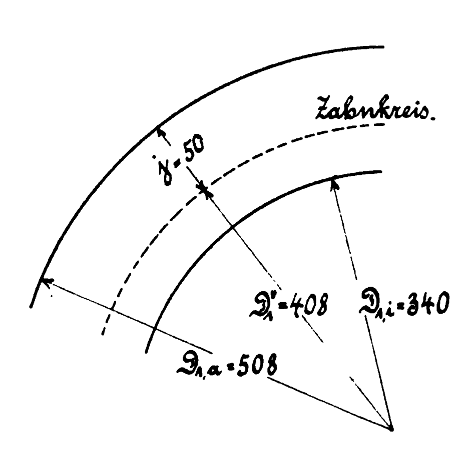


Fig. 177. Jochtiefe.

Berechnen wir die der Abkühlung ausgesetzte Oberfläche des Ständers in der Weise, daß wir die beiden Stirnflächen und den äußeren und inneren Zylindermantel desselben in Betracht ziehen, so erhalten wir für:

$$O_1 = 2 \,.\, \frac{\pi}{4} (D_{1,a}^2 - D_{1,i}^2) + \pi \,.\, l \,.\, (D_{1,a} + D_{1,i}) =$$

$$= \frac{\pi}{2} (\overline{50{\cdot}8}^2 - \overline{34{\cdot}0}^2) + \pi \,.\, 10 \,.\, (50{\cdot}8 + 34{\cdot}0) = \text{rund } 4900 \; cm^2.$$

Für die Berechnung der Temperaturzunahme t_1 des Ständers wollen wir die Formel von Fischer-Hinnen anwenden, die für ruhende Spulen gilt.[1])

---

[1]) Arnold: Gleichstrommaschinen, 1902, XXV. Kapitel.

Es ist nach derselben:

$$t_1{}^0\,C = 335 \,.\, \frac{\text{Wattverluste}}{\text{Oberfläche } cm^2} = \frac{335 \,.\, 845}{4900} = 57{\cdot}5^0\ C.$$

Da jedoch der rotierende Anker ventilierend wirkt, wird t_1 niedriger ausfallen, also einen unzulässigen Wert nicht annehmen.

124. Berechnung des Läufers. Gisbert Kapp[1]) gibt an, daß man bei zwei Nuten pro Spulenseite im Ständer drei Nuten pro Spulenseite im Läufer nehmen soll. Halten wir uns an diese Angabe, so erhält der Läufer $6 \,.\, 3 \,.\, 3 = 54$ Nuten. Wird die Wicklung als Arnoldsche Reihenwicklung (Trommelanker) ausgeführt und nehmen wir zwei Leiter pro Nut, so wird, wenn wir die Gesamtzahl aller Läuferleiter $3\ Z_2$ mit s bezeichnen: $s = 2 \,.\, 54 = 108$.

Z_2 ist die Drahtzahl pro Phase.

Es ist nun zu untersuchen, ob sich mit $s = 108$ eine einfach geschlossene sechspolige Reihenwicklung ausführen läßt.

Bezeichnet: y_1 den Wickelschritt auf der Vorderseite des Läufers,

y_2 den Wickelschritt auf der Rückseite des Läufers,

$y = y_1 + y_2$ den Wickelschritt zwischen zwei aufeinander folgenden gleicharmigen Polen,

p die Polpaarzahl,

so ist nach Arnold[2]) für eine gewöhnliche Reihenwicklung;

$$y = \frac{s \pm 2}{p};$$

$\frac{s}{2}$ und $\frac{y}{2}$ müssen, damit die Wicklung nur eine Schließung erhält, teilerfremd sein. y muß eine gerade Zahl sein und y_1 als auch y_2 sind ungerade Zahlen. Auf die Entwicklung und Erklärung dieser Beziehungen wurde an anderer Stelle (111), die auch das zugehörige Wickelschema brachte, näher eingegangen.

Es ist ohneweiters zu ersehen, daß diese Bedingungen bei $s = 108$ und $p = 3$ nicht zu erfüllen sind. Nehmen wir nur 53 Nuten, so daß $s = 2 \,.\, 53 = 106$ wird, so erhalten wir:

$$y = \frac{s \pm 2}{p} = \frac{106 \pm 2}{3} = 36,$$

da nur bei Berücksichtigung des positiven Vorzeichens y eine gerade, ganze Zahl wird.

---

[1]) Gisbert Kapp: Elektromechanische Konstruktionen.

[2]) Arnold: Die Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen der Gleichstromdynamomaschinen, 1899, Seite 110, und Gleichstrommaschinen, 1902.

$\frac{y}{2} = 18$ und $\frac{s}{2} = 53$ sind teilerfremd, y_1 wird 17 und $y_2 = 19$ gewählt.

$$y_1 + y_2 = 17 + 19 = 36 \text{ oder gleich } y.$$

Zur Festlegung der Querschnitte der Läuferleiter benötigen wir den Läuferstrom. Wir bestimmen denselben vorläufig so, daß wir das Produkt Primärstrom $\times$ Primärwindungen dem Produkte Sekundärstrom $\times$ Sekundärwindungen gleichsetzen. Statt den Windungen können wir auch Z_1 und Z_2 (pro Phase) einsetzen, da ja die Windungszahl $\xi_1 = \frac{3\, Z_1}{2}$ und $\xi_2 = \frac{3\, Z_2}{2}$ ist und daher die Konstante $\frac{3}{2}$ auf beiden Seiten der Gleichung herausfällt. Den so berechneten Sekundärstrom i_2'' nehmen wir etwas kleiner an, da ja aus Fig. 171 folgt, daß der wirkliche Läuferstrom i_2'' infolge des Magnetisierungsstromes kleiner ausfällt als der aus der Gleichsetzung der Ampèrewindungen ermittelte. Nach Festlegung der Eisen- und Kupferdimensionen des Läufers wird dann i_2'' genau bestimmt.

Wir haben vorläufig:

$$i_2'' \,.\, Z_2 = i_1 \,.\, Z_1.$$

$$i_2'' = \frac{i_1 \,.\, Z_1}{Z_2} = \frac{63{\cdot}5 \,.\, 108}{\frac{106}{3}} = 195 \text{ Ampère.}$$

Wir nehmen i_2'' etwas kleiner an, und zwar zu 180 Ampère. Bei einer Stromdichte von 2·5 Ampère erhalten wir einen Querschnitt des Läuferkupfers von:

$$q_2 = \frac{180}{2{\cdot}5} = 72 \; mm^2.$$

Wir schalten wieder je zwei Leiter parallel und wählen einen Stabquerschnitt von 3 $mm \times 12$ mm. Die Stäbe werden in der Läufernut so angeordnet, wie Fig. 178 zeigt. Parallel geschaltet wird Stab 1 mit 2 und Stab 3 mit 4. Die Nutendimensionen des Läufers ergeben sich dann zu:

$$\beta_2 = 2 \,.\, 3 \; mm + 2 \; mm = 8 \; mm \text{ und}$$
$$\gamma_2 = 2 \,.\, 12 \; mm + 6 \; mm = 30 \; mm,$$

unter denselben Betrachtungen wie beim Ständer. In Fig. 179 erhalten wir, wenn ein Luftspalt von 1 mm (einseitig) vorgesehen wird,

$$\vartheta_2'' = \frac{D_2'' \,.\, \pi}{N_2} - 0{\cdot}8 \; cm = \frac{27{\cdot}8 \,.\, \pi}{53} - 0{\cdot}8 \; cm = 0{\cdot}85 \; cm;$$

dies ist die kleinste vorkommende Zahnbreite im Motor, die, mechanische

Rücksichten erwogen, ohneweiters herstellbar ist. Die Zahnbreite ϑ_2' ergibt sich zu:

$$\vartheta_2' = \frac{D_2' \cdot \pi}{N_2} - 0{\cdot}8\,cm = \frac{33{\cdot}4 \cdot \pi}{53} - 0{\cdot}8\,cm = 1{\cdot}18\,cm.$$

Der äußere Läuferdurchmesser $D_{2,a}$ wird bei einem Luftspalt von 1 *mm* einseitig:

$$D_{2,a} = D_{1,i} - 2 \cdot 1 = 340 - 2 = 338\,mm.$$

Berechnen wir unter Zugrundelegung der beiden Zahnbreiten ϑ_2' und ϑ_2'' einen mittleren Läuferzahnquerschnitt $Q_{2,z}$, so erhalten wir für denselben:

$$Q_{2,z} = \frac{N_2}{2 \cdot p} \cdot l_w \cdot \frac{\vartheta_2' + \vartheta_2''}{2} = \frac{53}{6} \cdot 9 \cdot \frac{1{\cdot}18 + 0{\cdot}85}{2} \cong 81\,cm^2.$$

Der Zahnquerschnitt am Zahnfuß, der Zahnbreite ϑ_2'' entsprechend, beträgt:

$$\frac{N_2}{2 \cdot p} \cdot l_w \cdot \vartheta_2'' = \frac{53}{6} \cdot 9 \cdot 0{\cdot}85 = 67{\cdot}5\,cm^2.$$

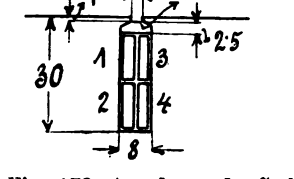


Fig. 178. Anordnung der Stäbe in einer Läufernut.

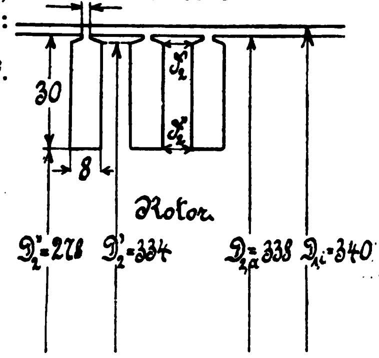


Fig. 179. Bestimmung der Zahnbreite und des Läuferdurchmessers u. s. w.

Ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen, setzen wir das Läuferfeld $N_2 = \frac{\text{Luftfeld}}{1{\cdot}05}$ (ohne es von τ_1, τ_2 und von der Belastung abhängig zu machen) und erhalten:

$$N_2 = \frac{N_l}{1{\cdot}05} = \frac{0{\cdot}52 \cdot 10^6}{1{\cdot}05} = 0{\cdot}495 \cdot 10^6.$$

Die mittlere Sättigung am Zahnfuß ϑ_2'' ergibt sich nun zu

$$\frac{0{\cdot}495 \cdot 10^6}{67{\cdot}5} = 7{\cdot}3 \cdot 10^3,$$

ein Wert, der zulässig ist.

Die mittlere Zahnsättigung, die wir uns längs des ganzen Zahnweges konstant denken, erhalten wir beim Läufer zu:

$$B_{2,z}\ \text{mittl.} = \frac{N_2}{Q_{2,z}} = \frac{0{\cdot}495 \cdot 10^6}{81} = 6{\cdot}1 \cdot 10^3.$$

Lassen wir im Kern des Läufereisens eine mittlere Induktion $B_{2,k}$ mittl. von $6{\cdot}0 \cdot 10^3$ zu, so erhalten wir, ähnlich wie beim Ständerjoch, die Dimension g in Fig. 180 zu:

$$g = \frac{N_2}{2 \cdot B_{2,k}} \cdot \frac{1}{l_w} = \frac{0{\cdot}495 \cdot 10^6}{2 \cdot 6{\cdot}0 \cdot 10^3 \cdot 9} = \text{rund } 4{\cdot}5 \; cm.$$

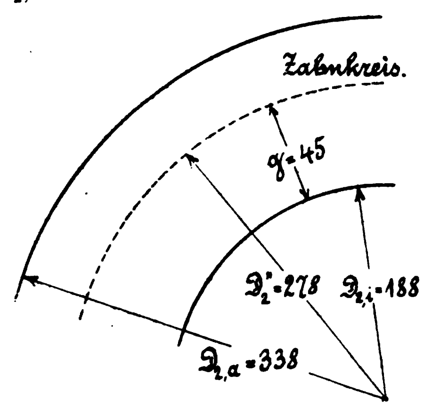


Fig. 180. Läuferabmessungen.

l_w ist die wirksame Läuferbreite (abzüglich Isolation), die gleich der wirksamen Ständerbreite ist. Wir erhalten nun den inneren Läuferdurchmesser $D_{2,i}$ zu:

$$D_{2,i} = D_{2,a} - 2\,\gamma_2 - 2\,g = 338 - 2 \cdot 30 - 2 \cdot 45 = 188 \; mm.$$

125. Berechnung der Verluste. Die Eisenverluste im Läufer sind, da für den normalen Betriebszustand die Schlüpfung sehr gering ist, das heißt, da die Periodenzahl im Läufer sehr klein ausfällt, ganz unwesentlich. Um die Kupferverluste ermitteln zu können, berechnen wir uns zunächst den Ohmschen Widerstand der Sekundärwicklung.

Die mittlere Länge eines wirksamen Stabes ergibt sich zu etwa 0·35 *m*. Da wir im ganzen 106 Stäbe einer Phase haben, berechnet sich die gesamte Länge der wirksamen Stäbe einer Phase zu:

$$l_{g,2} = \frac{106}{3} \cdot 0{\cdot}35 = 12{\cdot}4 \; m.$$

Jeder wirksame Stab besteht aus zwei parallel geschalteten Leitern von je (3 . 12) mm^2 Querschnitt; mithin ergibt sich der Ohmsche Widerstand einer Läuferphase zu:

$$W_2 = \frac{l_{g,2}}{50 \cdot 2 \cdot (3 \cdot 12)} = 0{\cdot}00345 \text{ Ohm}.$$

Die Kupferverluste betragen demnach bei normalem Betriebe im Läufer:

$$V_{cu2} = 3 \cdot i_2''^2 \cdot W_2 = 3 \cdot \overline{180}^2 \cdot 0{\cdot}00345 = \text{rund } 340 \text{ Watt}.$$

Die Oberfläche des Läufers ergibt sich, wenn wir auch hier die beiden Stirnflächen und den äußeren und inneren Zylindermantel in Betracht ziehen, zu:

$$O_2 = 2 \cdot \frac{\pi}{4} D_{2}^{2},_{a} - D_{2}^{2},_{i}) + \pi \cdot l \cdot (D_{2,a} + D_{2,i}$$

$$= \frac{\pi}{2} (\overline{33{\cdot}8}^2 - \overline{18{\cdot}8}^2) + \pi \cdot 10 \cdot (33{\cdot}8 + 18{\cdot}8) = 2800\ cm^2.$$

Nach Arnold[1]) erhalten wir für die Temperaturzunahme rotierender Anker:

$$t^0 c = \frac{300 \cdot \text{Wattverluste}}{\text{Oberfläche } cm^2 \cdot (1 + 0{\cdot}1\ v)}.$$

v bedeutet dabei die sekundliche Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Ankers in Metern und beträgt in unserem Falle 18 m. Wir erhalten daher für die Temperaturzunahme $t_2{}^0$ des Läufers:

$$t_2{}^0 = \frac{300 \cdot 340}{2800\ (1 + 1{\cdot}8)} = 13^0\ \text{C}.$$

126. Berechnung des Magnetisierungsstromes. Aus der Zeichnung, die sich nun aus den bisher berechneten Angaben festlegen läßt, können wir die Längen der magnetischen Wege entnehmen. Wir berechnen die Ampèrewindungen pro Pol und haben daher die einfachen Weglängen zu berücksichtigen.

Aus der Zeichnung finden wir:

Magnetische Weglänge im Ständerjoch, $l_j = 7\ cm$ (einfache Länge); mittlere Sättigungen: $6{\cdot}0 \cdot 10^3$.

Magnetische Weglänge in den Ständerzähnen $l_{1,z} = 3{\cdot}4\ cm$ (einfache Länge); mittlere Sättigungen: $6{\cdot}0 \cdot 10^3$.

Magnetische Weglänge in der Luft $l_l = 0{\cdot}1\ cm$ (einfache Länge); mittlere Sättigungen: $3{\cdot}5 \cdot 10^3$.

Magnetische Weglänge in den Läuferzähnen $l_{2,z} = 3{\cdot}0\ cm$ (einfache Länge); mittlere Sättigungen: $6{\cdot}1 \cdot 10^3$.

Magnetische Weglänge im Läuferkern $l_k = 5{\cdot}0\ cm$ (einfache Länge). mittlere Sättigungen: $6{\cdot}0 \cdot 10^3$.

Rechts von obigen Längenangaben sind die berechneten mittleren Sättigungen auf der betreffenden Wegstrecke wiederholt. Aus einer Magnetisierungskurve oder aus einer Tabelle (57) entnehmen wir für die Eisensättigungen von $6{\cdot}0 \cdot 10^3 \ldots\ldots 2{\cdot}5$ Ampèrewindungen pro 1 cm Weglänge. Der gesamte Weg der Kraftlinien beträgt im Eisen

[1]) Arnold: Die Ankerwicklungen und Ankerkonstruktionen der Gleichstrommaschinen, 1899, Seite 259.

18·4 *cm*, daher ist die Ampèrewindungszahl pro Pol (einfache Weglänge) für das Ständer- und Läufereisen: $18{\cdot}4 \,.\, 2{\cdot}5 = 46$.

Die Ampèrewindungszahl für 1 *cm* Länge bestimmt sich für die Luft zu:

$$A\,W_p \,.\, cm. = 0{\cdot}8 \; B_l \text{ mittl.} = 0{\cdot}8 \,.\, 3500 = 2800.$$

Für $l_l = 0{\cdot}1$ *cm* erhalten wir daher die Luftampèrewindungen zu $A\,W_l = 280$.

Die gesamte Ampèrewindungszahl beträgt mithin rund 330.

Nach Formel 13 erhält man nun für den Magnetisierungsstrom einer Phase:

$$i_m = 1{\cdot}7 \,.\, \frac{A\,W\,(\text{pro Pol}) \,.\, p}{Z_1} = \frac{1{\cdot}7 \,.\, 330 \,.\, 3}{108} = \text{rund } 16 \text{ Ampère.}$$

127. Berechnung des Leerstromes. Nach Formel 14 erhalten wir für die Wattkomponente des Leerstromes, welche die Eisenverluste im Ständer und die Reibungsverluste zu decken hat:

$$i_{w0} = \frac{V_{h+r}}{3 \,.\, e_1} = \frac{450 + 0{\cdot}5 \,.\, 450}{3 \,.\, 63{\cdot}6} = 3{\cdot}55 \text{ Ampère,}$$

wenn die Reibungsverluste mit 50% der Ständereisenverluste angenommen werden. Der Leerstrom i_0 ergibt sich nun nach Formel 15 zu:

$$i_0 = \sqrt{i_m^2 + i_{w0}^2} = \sqrt{16^2 + 3{\cdot}55^2} = 16{\cdot}4 \text{ Ampère.}$$

128. Streuung. Die Vorausberechnung derselben aus den Eisenabmessungen gestaltet sich recht schwierig und wird diesbezüglich auf die Arbeiten von Niethammer[1]) und Jonas[2]) verwiesen. In der Praxis bestimmt man den Streufaktor $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \,.\, \tau_2$ in der Regel so, daß man den Leerstrom und den Kurzschlußstrom (primär) mißt. Um die letztere Größe zu erhalten, wird der Läufer festgebremst und primär Spannung zugeführt. Im allgemeinen ist es nicht angängig, die volle Betriebsspannung (primär) zuzuführen, da man bei fest gebremstem Läufer in der Regel bei 1/4 bis 1/3 der vollen Spannung schon den normalen Strom i_1 in der Ständerwicklung haben wird. Man würde dann, wenn man den Motor an die volle Spannung anschließt, etwa den vierfachen Betriebsstrom im Ständer haben, den die Wicklung unter Umständen nicht vertragen könnte. Man begnügt sich daher, so viel Spannung zuzuführen, bis der etwa 1·5fache Normalstrom erreicht ist. Nennen wir den bei dieser Spannung auftretenden Kurzschlußstrom $i_1{}'_k$, die zugehörige Spannung e_{1k}, so ist der Kurzschlußstrom i_{1k} bei der normalen Spannung e_1:

$$i_{1k} = i_{1k}' \,.\, \frac{e_1}{e_{1,k}}.$$

---

1) Niethammer: Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, Seite 770.

2) Jonas: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, Seite 448.

Führt man noch eine Wattmessung bei Kurzschluß aus, so erhält man aus:

$$3 \cdot i_{1k} \cdot e_1 \cdot \cos\varphi_{1k} = \text{Watt (bei Kurzschluß)}$$

$$\cos\varphi_{1k} = \frac{\text{Watt (bei Kurzschluß)}}{3\, i_{1k} \cdot e_1}$$

noch die Richtung des primären Kurzschlußstromes. Indem man nun in Fig. 172 den Leerstrom $i_0 = O\,A_1$ und den Kurzschlußstrom $i_{1k} = O\,B_1'$, in seiner richtigen Lage ($\sphericalangle\, \varphi_{1k}$) und Größe aufträgt, läßt sich der Kreisbogen $A_1\,B_1'\,A_1'$ ohneweiters festlegen und $\tau = \frac{i_0}{A\,A_1'}$ ist bekannt. Im folgenden wollen wir noch, wie es in der Praxis üblich ist, das Glied $\tau_1 \cdot \tau_2$ vernachlässigen und $\tau_1 = \tau_2 = \frac{\tau}{2}$ setzen, da der Unterschied zwischen τ_1 und τ_2 meist ganz unwesentlich ist. Es sei noch bemerkt, daß in Fig. 172 $O\,A_1$ eigentlich den Magnetisierungsstrom (und nicht den Leerstrom) vorstellen sollte. Wir haben jedoch schon aus der Rechnung ersehen, daß der Unterschied zwischen i_0 und i_m so gering ist, daß wir ohne Fehler $O\,A_1 = i_0$ zeichnen können. An ähnlichen Ausführungen wie der berechnete Motor fand man $\tau = 0{\cdot}08$ durch Probe und wir erhalten, entsprechend dem Vorausgegangenen, $\tau_1 = \tau_2 = 0{\cdot}04$.

Allen bisherigen Rechnungen lag die Schätzung von η und $\cos\varphi_1$, sowie eine recht rohe Bestimmung des Läuferstromes i_2'' zu grunde. Wir wollen nun alle interessierenden Größen genauer bestimmen, was jetzt, da alle Eisen- und Kupferdimensionen festgelegt sind, keine Schwierigkeiten mehr bietet. Die Durchrechnung soll sich auf die genauere Ermittlung der Größen für den normalen Betriebszustand und die Bestimmung des Kurzschlußstromes ($i_{1\,k}$) beschränken und nach den schon gegebenen Ausführungen von Weißhaar erfolgen. Zur Verfolgung der Verhältnisse vom Leerlauf bis zum Kurzschluß des Motors kann dann das früher ausführlich besprochene graphische Verfahren nach Heyland angewendet werden.

Wir könnten auch die im Diagramm, Fig. 172, zum Ausdruck gelangenden Größen i_w, i_w' und i_w'', sowie $\cos\varphi_1$ zur Konstruktion der Betriebskurven heranziehen. Um jedoch das Heylandsche Diagramm verwenden zu können, passen wir uns dem Gedankengange an, wir hätten die berechneten Größen mittels des Leerlauf- und Kurzschlußversuches gemessen und können dann alle Kurven nach dem Verfahren von Heyland ermitteln.

129. Durchrechnung der interessierenden Größen für den normalen Betriebszustand. Alle Werte verstehen sich im folgenden für eine Phase.

Wir setzen $i_0 = i_m = 16$ Ampère.

Die Widerstände pro Phase betragen:

$w_1 = 0{\cdot}0326$; warm, d. h. Leitungsfähigkeit $K = 50$.

Nach Formel 17 ist:

$$w_2' = w_2 \cdot \left[\frac{Z_1}{Z_2}(1 + \tau_1)\right]^2 = 0{\cdot}00345 \left[\frac{108}{\frac{106}{3}}(1 + 0{\cdot}04)\right]^2 = 0{\cdot}035;$$

warm, d. h. Leitungsfähigkeit $K = 50$.

Nach Gleichung 18 ist:

$$r = \frac{i_m}{2\tau} = \frac{16}{2 \,.\, 0{\cdot}08} = 100, \text{ der Halbmesser des Diagrammkreises.}$$

$2r = 200$;

Aus Fig. 161 folgt: $a = r + i_m = 100 + 16 = 116$; $2a = 232$;

$$r^2 = 10000$$

$$a^2 = 13456$$

$$r^2 + a_2 = 23456;$$

$$c_1 = \frac{w_1}{e_1} = \frac{0{\cdot}0326}{63{\cdot}6} = 0{\cdot}000512$$

$$c_2 = \frac{w_2'}{e_1} = \frac{0{\cdot}035}{63{\cdot}6} = 0{\cdot}00055$$

$$n' = 2 \,.\, a \,.\, c_1 = 232 \,.\, 0{\cdot}000512 = 0{\cdot}119;$$

$$2 \,.\, r \,.\, c_2 = 200 \,.\, 0{\cdot}00055 = 0{\cdot}11;$$

$$n'' = n' + 2 \,.\, r \,.\, c_2 = 0{\cdot}229;$$

$$n''^2 = 0{\cdot}0525;$$

$$2\, r^2 = 20000;$$

$$1 + n''^2 = 1{\cdot}0525;$$

$$r^2 (1 + n''^2) = 10525;$$

$$c = \frac{3 \,.\, e_1}{736} = \frac{3 \,.\, 63{\cdot}6}{736} = 0{\cdot}258;$$

$$(a^2 + r^2) \,.\, c_1 = 23456 \,.\, 0{\cdot}000512 = 12;$$

$$i_{w0} = 3{\cdot}55;$$

$$m' = (a^2 + r^2)\, c_1 + i_{w0} = 12{\cdot}0 + 3{\cdot}55 = 15{\cdot}55;$$

$$2\, r^2 \,.\, c_2 = 20000 \,.\, 0{\cdot}00055 = 11;$$

$$m'' = (a^2 + r^2)\, c_1 + i_{w0} + 2 \,.\, r^2 \,.\, c_2 = 12 + 3{\cdot}55 + 11 = 26{\cdot}55.$$

Der Wattstrom i_w'', der den abgegebenen 12 *PS* entspricht, beträgt da:

$$c \,.\, i_w'' = PS,$$

$$i_w'' = \frac{12\, PS}{0{\cdot}258} = 46{\cdot}6 \text{ Ampère.}$$

Wir erhalten nun nach Gleichung 26 *b* für den zugeführten Wattstrom:

$$i_w = \frac{i_w'' + m'' - n'' \sqrt{r^2 (1 + n''^2) - (i_w'' + m'')^2}}{1 + n''^2} =$$

$$= \frac{46{\cdot}6 + 26{\cdot}55 - 0{\cdot}229 \sqrt{10525 - (46{\cdot}6 + 26{\cdot}55)^2}}{1{\cdot}0525} = 53{\cdot}5 \text{ Ampère.}$$

Daraus ergibt sich nach Formel 32 *c* der Wirkungsgrad η des Motors zu:

$$\eta = \frac{i_w''}{i^w} = \frac{46{\cdot}6}{53{\cdot}5} = 0{\cdot}875.$$

Aus Gleichung 19 folgt die Diagrammgröße u zu:

$$u = \sqrt{r^2 - i_w^2} = \sqrt{(100)^2 - (53{\cdot}5)^2} = 84{\cdot}6$$

und nach Formel 25 *a*:

$$i_w' = i_w - m' + n' u = 53{\cdot}5 - 15{\cdot}55 + 0{\cdot}119 \,.\, 84{\cdot}6 = 48 \text{ Ampère.}$$

Aus 33 folgt nunmehr die prozentuale Schlüpfung zu:

$$s^0/_0 = 100 \left(1 - \frac{i_w''}{i_m'}\right) = 100 \left(1 - \frac{46{\cdot}6}{48}\right) = 3{\cdot}8^0/_0.$$

Setzen wir u und i_w in Formel 20 *a* und 20 *b* ein, so erhalten wir:

$$tg\ \varphi_1 = \frac{a - u}{i_w} = \frac{116 - 84{\cdot}6}{53{\cdot}5} = 0{\cdot}59;$$

$$tg\ \varphi_2 = \frac{r - u}{i_w} = \frac{100 - 84{\cdot}6}{53{\cdot}5} = 0{\cdot}289;$$

daher ist:

$$cos\ \varphi_1 = 0{\cdot}861,$$
$$cos\ \varphi_2 = 0{\cdot}961.$$

Aus Formel 22 *a* und 22 *b* folgt:

$$i_1 = \frac{i_w}{cos\ \varphi_1} = \frac{53{\cdot}5}{0{\cdot}861} = 62 \text{ Ampère}$$

und die Diagrammgröße

$$i_2 = \frac{i_w}{cos\ \varphi_2} = \frac{53{\cdot}5}{0{\cdot}961} = 55{\cdot}5 \text{ Ampère.}$$

Der wahre Läuferstrom i_2'' folgt dann nach den früheren Entwicklungen zu:

$$i_2'' = i_2 (1 + \tau_1) \,.\, \frac{Z_1}{Z_2} = 55{\cdot}5 \,.\, 1{\cdot}04 \,.\, \frac{108}{\frac{106}{3}} = 177 \text{ Ampère,}$$

statt 180 Ampère, wie annähernd ausgerechnet wurde.

Da auch i_1 mit dem früher bestimmten Werte annähernd übereinstimmt, ist eine Abänderung der Kupferquerschnitte nicht nötig.

130. Bestimmung der Richtung und der Größe des primären Kurzschlußstromes. Für den Kurzschlußpunkt ist nach Formel 28:

$$\dot{i}_{w\,k} = \frac{m'' + n'' \sqrt{r^2 (1 + n''^2) - m''^2}}{1 + n''^2} =$$

$$= \frac{26{\cdot}55 + 0{\cdot}229 \sqrt{10525 - 705}}{1{\cdot}0525} = 47 \text{ Ampère.}$$

Daraus folgt die Diagrammgröße u zu:

$$u = \sqrt{r^2 - \dot{i}_{w\,k}^2} = \sqrt{10.000 - 47^2} = 88{\cdot}5.$$

Wir erhalten nach den Gleichungen 29, 30 und 31:

$$tg\,\varphi_{1k} = \frac{a + \sqrt{r^2 - i^2_{w\,k}}}{\dot{i}_{w\,k}} = \frac{116 + 88{\cdot}5}{47} = 4{\cdot}35;$$

$$cos\,\varphi_{1k} = 0{\cdot}223;$$

$$\dot{i}_{1k} = \frac{\dot{i}_{w\,k}}{cos\,\varphi_k} = \frac{47}{0{\cdot}223} = 211 \text{ Ampère.}$$

Die Berechnung von Drehstrommotoren betreffend, sei hier auch auf die Arbeiten von J. Fischer-Hinnen[1]) verwiesen.

VI. Kapitel.

Vorgang im Induktionsmotor. (§ 99.)

131. Kurzschlußanker. Die größte Einfachheit zeigt der Kurzschlußanker (§ 107 und § 110). Da demselben von außen kein Strom zugeführt wird, hat derselbe auch keine Schleifringe. Ein solcher Läufer arbeitet beim Betrieb sehr gut, bietet jedoch beim Anlauf Schwierigkeiten. Wir können den Induktionsmotor mit einem Transformator vergleichen. Schalten wir die Ständerwicklung eines Drehstrommotors (§ 99) durch das Schließen eines dreipoligen Ausschalters in das Leitungsnetz ein, so können wir den Läufer, solange er feststeht, als sekundäre Wicklung eines Transformators ansehen. Bei letzterem schwingt das Feld allerdings hin und her, während sich dasselbe beim Drehstrommotor im Kreise dreht (S. 57). Das Drehfeld erzeugt in den Wicklungen des Ständers — die wir mit der primären Wicklung des Transformators vergleichen — und im Läufer *EMK*. Ist beim Transformator die sekundäre Wicklung offen, so entsteht in der primären Wicklung nur ein geringer Strom (Magnetisierungsstrom). Erst wenn man in die sekundäre Wicklung Glühlampen u. s. w. einschaltet, fließt

[1]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1900, S. 346.

in der sekundären Wicklung Strom. Ähnlich so verhält es sich beim Drehstrommotor. Wenn der Läufer offen wäre, so würde die Gegen-*EMK* im Ständer der zugeführten Spannung nahezu gleich sein und es würde nur der Magnetisierungsstrom durch die primäre Wicklung fließen. Da jedoch der Läufer kurzgeschlossen ist, wird in ihm sofort Strom erzeugt. Der Magnetisierungsstrom hat beim Drehstrommotor einen größeren Wert als beim Transformator, weil die Kraftlinien bei ersterem auf ihrem Wege zweimal durch die Luft hindurchgehen müssen. Der Luftspalt wird deshalb sehr klein gewählt, so daß der Abstand zwischen Ständer und Läufer nur 0·2 bis 2 *mm* beträgt. Die Anzahl der erforderlichen magnetisierenden Ampèrewindungen ist deshalb beim Drehstrommotor bedeutend größer als beim Transformator. Beim Anlauf dreht sich das Feld mit voller Geschwindigkeit um den noch stillstehenden kurzgeschlossenen Läufer. Demnach fließt in der Läuferwicklung ein sehr großer Strom, welcher das Primärfeld des Ständers schwächt, so daß ein starker Strom aus dem Netze in die Ständerwicklung eintritt. Der starke Strom im Läufer bringt denselben zum Anlauf. Je rascher sich der Läufer dreht, desto näher kommt er der Drehgeschwindigkeit des Drehfeldes, desto weniger *EKM* wird in ihm induziert. Der Läuferstrom erreicht dann eine geringe Stärke und sowohl die Läuferrückwirkung auf das Drehfeld als auch der Stromverbrauch des Ständers werden geringer.

Ein Drehstrommotor für 15 Ampère z. B. braucht beim Leerlauf (ohne Belastung) etwa 5 Ampère, also rund $^1/_3$ des normalen Stromes. Die verbrauchte Leistung ist jedoch nicht gleich $^1/_3$ der Leistung bei normalem Betrieb, weil die Phasenverschiebung (S. 85) in Betracht kommt. Letztere ist hier (sowie beim leerlaufenden Transformator) sehr groß. Der Leistungsfaktor schwankt etwa zwischen 0·3 und 0·2. Wir können also nur $5 \cdot 0{\cdot}3 = 1{\cdot}5$ Ampère in die Rechnung einführen, das sind 10%, oder $5 \cdot 0{\cdot}2 = 1$ Ampère, das sind $6^2/_3$% des normalen Stromes. Es wird demnach die Leistung des leerlaufenden Motors $^1/_{10}$ oder $^1/_{15}$ des Wattverbrauches des vollbelasteten Motors sein. Für den Augenblick des Einschaltens erreicht der Strom den dreifachen Wert des normalen Stromes. Befinden sich Lampen im Netze, so muß jeder Stromstoß vermieden werden. In diesem Falle hat schon ein Motor mit Kurzschlußanker von $^1/_2$ *PS* ein Zucken des Lichtes zur Folge.

132. Läufer mit Schleifringen. Die zuletzt erwähnten Stromstöße vermeiden Läufer mit Schleifringen (§ 107 und § 110). Der Ständer besitzt dann dieselbe Wicklung wie der Läufer (§ 108 und § 112). Die Läuferwicklung kann beim Drehstrommotor ein-, zwei- oder dreiphasig sein. Die vorteilhafteste Wicklung ist jedoch die Drei-

phasenwicklung mit Sternschaltung, welche ganz allgemein Anwendung findet. Man schaltet also die Dreiphasenwicklung in Stern und führt die drei Enden zu den drei Schleifringen. Auf den letzteren liegen Bürsten, von welchen Kabel zu Regulierwiderständen führen, die ebenfalls in Stern geschaltet und durch eine Kurbel verstellbar sind. Der Widerstand im Läufer sei nicht geschlossen. Der dreipolige Hebel, welcher die Ständerwicklung mit dem Netze verbindet, sei eingeschaltet. Dann wird in der Läuferwicklung eine *EMK* induziert, da jedoch im Läufer kein geschlossener Stromkreis vorhanden ist, so kann in demselben kein Strom fließen. Die Läuferrückwirkung auf das Ständerfeld ist daher gleich Null. Es fließt durch den Ständer nur der Magnetisierungsstrom (etwa $^1/_3$ des normalen Stromes). Das Drehfeld rotiert um den Läufer, z. B. ein sechspoliges Feld mit einer Geschwindigkeit von 1000 Umdrehungen in der Minute. Der Läufer ist dann gleichsam der ruhende Anker einer Drehstrommaschine, um welchen sich ein sechspoliges Feld dreht. In einem solchen Anker wird ebenfalls Spannung, jedoch kein Strom induziert, solange der äußere Stromkreis oder Widerstand nicht in den Anker eingeschaltet ist. Belasten wir den Anker, so fließt durch denselben sowie durch die Belastungswiderstände Strom und der Anker dreht sich. Bei richtiger Einstellung der Widerstände wird der Strom den normalen Wert erreichen, gerade so, wie bei richtiger Wahl der Wicklung durch den Ständer der normale Strom fließt. Dreht sich der Läufer, so wird die erzeugte *EMK* kleiner als im Zustande der Ruhe des Läufers und wir können demnach den in den Läufer einzuschaltenden Widerstand verkleinern. Jetzt läuft der Läufer schneller, so daß wir immer weniger und weniger Widerstand einstellen können. Läuft der Läufer beinahe gerade so rasch wie das Feld (synchron mit dem Felde), so schließt man den Widerstand kurz. Im Betriebszustande wirkt also ein Anker mit Schleifringen gerade so wie ein Kurzschlußanker, weil der Schleifringanker während des Betriebes so wie der Kurzschlußanker kurzgeschlossen ist. Durch einen Spannungszeiger kann man sich ohneweiters davon überzeugen, daß die Spannung vor Einschaltung des Widerstandes zwischen je zwei Schleifringen einen hohen, nach Kurzschluß der Schleifringe dagegen einen sehr kleinen Wert hat. Bei Läufern mit hohen Spannungen ist deshalb besondere Vorsicht zu beobachten. Die Schleifringe müssen dann für Laien, wegen der gefährlichen Spannungen, unzugänglich sein; sie dürfen während des Anlassens nicht berührt werden. Ist die Windungszahl des Läufers größer als jene des Ständers, so wird die Spannung zwischen den Läuferschleifringen einen größeren Wert erreichen als zwischen den Ständerklemmen. Sind die Anzahl der Windungen des

Läufers und des Ständers einander gleich, dann sind auch die betreffenden Spannungen nahezu gleich. Durch einen Spannungszeiger oder durch Glühlampen kann man leicht die herrschenden Spannungsverhältnisse feststellen. Schaltet man eine Glühlampe, deren Spannung so groß ist als die Spannung zwischen zwei Schleifringen, zwischen zwei Schleifringe ein, so brennt dieselbe hell, wenn der Anlaßwiderstand des Läufers ausgeschaltet ist. Sie wird dunkler, wenn dieser Widerstand eingeschaltet wird und verdunkelt sich immer mehr, wenn man den Widerstand nach und nach kurzschließt. Die Spannung beträgt bei Kurzschluß des Anlassers im Läufer etwa einige Zehntel eines Volt.

Hier sei noch erwähnt, daß man bei Induktionsmotoren mit Schleifringen die Rollen von Läufer und Ständer miteinander vertauschen kann. Dann führt man dem Läufer Strom zu und schaltet den Anlaßwiderstand in die Ständerwicklung ein. Diese Anordnung kommt wohl nur ausnahmsweise und nur bei niedrigen Spannungen vor.

VII. Kapitel.

Umkehrung der Drehrichtung der Wechselstrommotoren.

133. Umkehrung der Drehrichtung eines Einphasenmotors. Bei einphasigen Synchronmotoren und einphasigen Induktionsmotoren ohne Hülfsphase ist für die Drehrichtung die Richtung, in welcher der betreffende Motor angedreht wurde, maßgebend. Diese Motoren haben also kein Streben, sich nach irgend einer Richtung zu drehen. Es sind daher zum Umkehren der Drehrichtung keinerlei Umschaltungen erforderlich. Für die einphasigen Induktionsmotoren mit Hülfsphase gilt bezüglich der Umkehrung der Drehrichtung dasselbe wie für einen Zweiphasenmotor. Der letztere Fall soll deshalb im nächsten Paragraphen besprochen werden.

134. Umkehrung der Drehrichtung eines Zweiphasenmotors. Bezüglich der Drehrichtung eines Zweiphasenmotors sei auf die Figuren 56 bis 59 verwiesen, aus welchen sich die Drehrichtung eines Läufers (in den Figuren Magnetnadel) ohneweiters ergibt. In den genannten Figuren dreht sich das Feld entgegengesetzt der Richtung eines Uhrzeigers. Kehren wir die Drehrichtung des Feldes um, so

kehren wir auch die Drehrichtung der Läufers um. Die Umkehrung der Drehrichtung des Feldes erfolgt in den folgenden Fällen:

1. Umkehrung der Stromrichtung in der Phase $I\ I_1$, Fig. 56. Dann entsteht oben ein Südpol, unten ein Nordpol (rechter Teil der Figur). Die Pole werden demnach im Ringe umgekehrt und die Magnetnadel steht auch mit den entgegengesetzten Polen den Polen des Ringes gegenüber. Die Anschlüsse der Phase $II\ II_1$ sind dieselben geblieben und es wird deshalb im Augenblicke 2, Fig. 57, der Nordpol links und der Südpol rechts entstehen so wie früher. Die Magnetnadel stellt sich horizontal, so wie es diese Figur zeigt. Vom Augenblicke 1, Fig. 56, bis zum Augenblicke 2, Fig. 57, bewegt sich der Nordpol der Nadel von oben, Fig. 56, nach rechts, Fig. 57, vom Augenblicke 2 bis zum Augenblicke 3 von rechts, Fig. 57, nach unten, Fig. 58, vom Augenblicke 3 bis zum Augenblicke 4 von unten, Fig. 58, nach links, Fig. 59. Man ersieht sofort, daß sich die Magnetnadel (beziehungsweise der Läufer) in der Richtung des Uhrzeigers bewegt, während vor der Umkehr des Stromes in der Phase $I\ I_1$ eine Bewegung im entgegengesetzten Sinne stattfand.

2. Umkehrung der Stromrichtung in der Phase $II\ II_1$, Fig. 56. Für diesen Fall gilt eine ganz ähnliche Betrachtung wie für den ersten Fall.

Kehrt man die Stromrichtung in beiden Phasen um, so bleibt die Drehrichtung selbstverständlich dieselbe.

3. Vertauschung der beiden Phasen. Vertauscht man die beiden Phasen, dann entsteht in Fig. 56 links ein Südpol, rechts ein Nordpol, der Nordpol der Magnetnadel befindet sich links, der Südpol derselben rechts. Im Augenblicke 2 erhält die Phase $I\ I_1$ Strom. Es entsteht im Ringe oben ein Südpol, unten ein Nordpol, die Magnetnadel zeigt den Nordpol nach oben, den Südpol nach unten, hat sich also während der Zeit vom Augenblicke 1 bis zum Augenblicke 2 im Sinne des Uhrzeigers bewegt. Es läßt sich ohneweiters so wie oben nachweisen, daß sich die Magnetnadel auch in der übrigen Zeit in demselben Sinne dreht. Die Drehrichtung der Magnetnadel (des Läufers) ist demnach umgekehrt worden.

Der erste und zweite Fall wird deshalb erfüllt sein, wenn wir bei Zweiphasensystemen mit vier Leitungen zwei Drähte einer Phase miteinander vertauschen. Der dritte Fall findet auf Zweiphasensysteme mit drei Leitungen Anwendung, wenn die beiden Außenleiter miteinander vertauscht werden.

Bei Einphasenmotoren mit Hülfsphase kann man sinngemäß die Drehrichtung dadurch umkehren, daß man entweder die beiden Enden

der Hauptphase oder die beiden Enden der Hülfsphase miteinander vertauscht.

135. Umkehrung der Drehrichtung eines Dreiphasenmotors. Ähnlich so wie wir das Drehfeld bei Zweiphasenstrom durch die Figuren 56 bis 59 erklärt haben, erklärt man das Drehfeld auch bei Dreiphasenstrom durch ebenso einfache Figuren. Man findet dann ohneweiters, daß die Drehrichtung sowohl bei Stern als auch bei Dreiecksschaltung umgekehrt wird, wenn man zwei beliebige von den drei Außenleitungen miteinander vertauscht. [Die Figuren 181 und 182

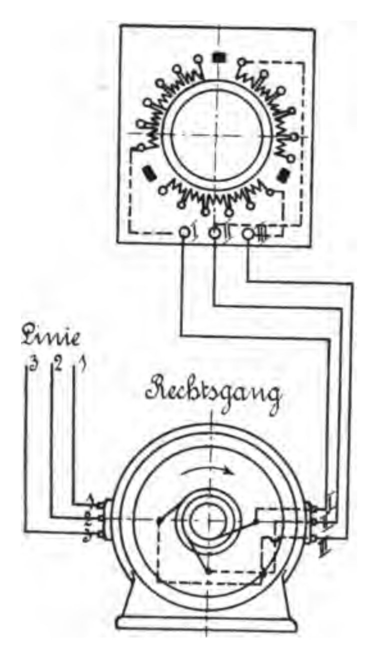


Fig. 181. Drehstrommotor. Rechtsgang.

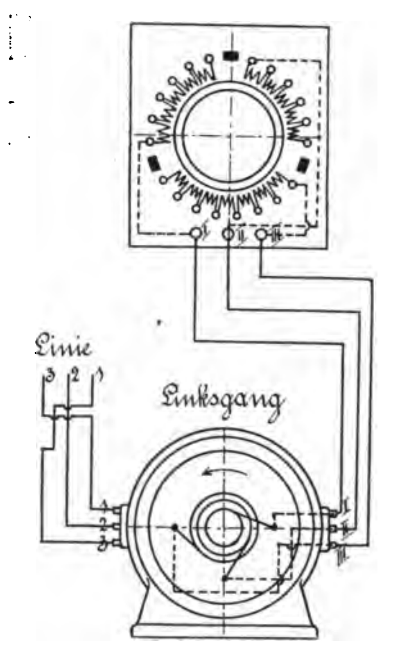


Fig. 182. Drehstrommotor. Linksgang.

veranschaulichen die Umkehrung der Drehrichtung bei Dreiphasenmotoren mit Anlassern im Läufer. In diesen Figuren sind die Dreiphasenmotoren, die Anlasser und die drei Leitungen der Linie 1, 2 und 3 für Rechtsgang, Fig. 181, und Linksgang, Fig. 182, zu ersehen. Bei Linksgang erscheinen die Leitungen 1 und 3 der Linie miteinander vertauscht.

Wie wir wissen, ist die Drehrichtung eines Dreiphasenmotors abhängig vom Drehsinne des vom Ständer erzeugten Feldes. Gelingt es uns also die Richtung des Drehfeldes umzukehren, so wird auch der Läufer des Motors seinen Drehsinn ändern.

In Fig. 183 sei A der Generator und B der mit A verbundene Motor. Der zeitliche Verlauf der Ströme in B sei im Vektorendiagramm, Fig. 184, dargestellt. Sind $\overline{J_1}$, $\overline{J_2}$ und $\overline{J_3}$ die einander gleichen Höchstwerte der Ströme in jeder Phase, so sind bekanntlich: $i_1 = \overline{J_1} \,.\, sin\, \alpha$,

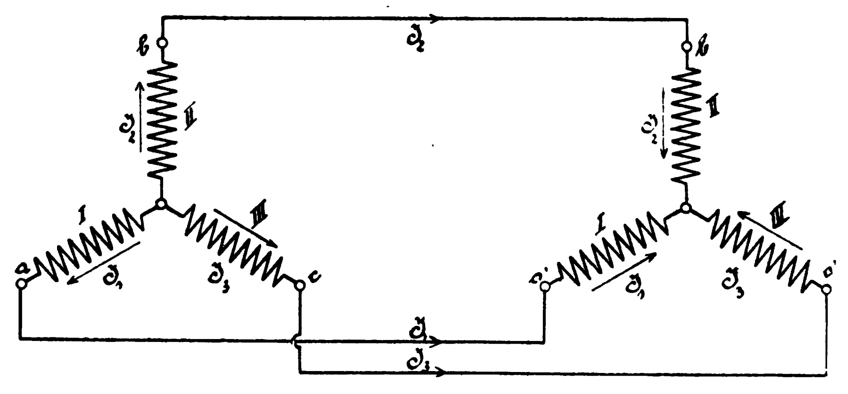


Fig. 183. Stromverlauf im Motor und Generator bei Linkslauf des Motors.

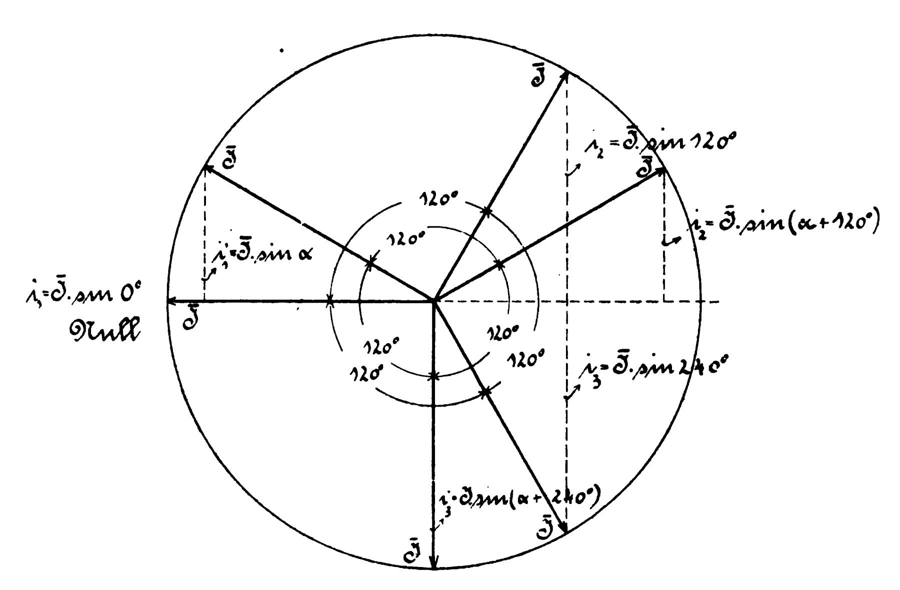


Fig. 184. Zeitliche Werte der Ströme im Motor bei Linkslauf.

$i_2 = \overline{J_2}\, sin\, (\alpha + 120^0)$ und $i_3 = \overline{J_3}\, sin\, (\alpha + 240^0)$ die Augenblickswerte. In jeder der drei Phasen des Motorständers entsteht nun ein Wechselfeld, dessen augenblickliche Größe von dem jeweiligen Phasenstrome abhängig ist.

Zeichnen wir in Fig. 185 die drei Windungsebenen der drei Phasen des Motorständers auf, so stehen die von den Strömen i_1, i_2 und i_3 geschaffenen Felder N_1, N_2 und N_3 senkrecht zu diesen Windungsebenen und sind den zugehörigen Strömen proportional.

Da es sich uns hier nicht um die absoluten Größen der Felder, sondern nur um deren Richtung handelt, setzen wir $N_1 = i_1$, $N_2 = i_2$ und $N_3 = i_3$. Diese drei Wechselfelder setzen sich nun zum resultierenden Felde N zusammen, welches die dem in Fig. 184 dargestellten Augenblickszustande entsprechende Richtung aufweist. Es ist zu beachten, daß die Richtung von N_3, da i_3 in Fig. 183 negativ ist, ebenfalls negativ ausfällt. Die positive Richtung von N_3 ist in Fig. 185

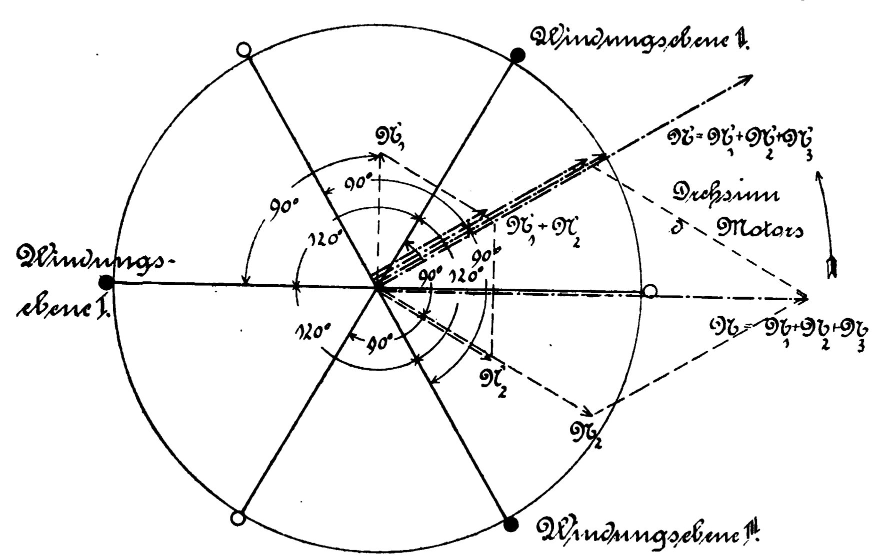


Fig. 185. Bestimmung der Richtung und Größe des Drehfeldes. Linkslauf.

einpunktiert. In einem der nächsten Zeitmomente werden die Ströme i_1, i_2 und i_3 in Fig. 185 die Werte i_1', i_2' und i_3' annehmen und die Felder N_1, N_2, N_3 und N in Fig. 185 gehen über in die Felder N_1', N_2', N_3' und N'.

N' unterscheidet sich der Größe nach nicht von N, da das Drehfeld, wie wir auf Seite 145 gesehen haben, für jeden Augenblick konstant bleibt und proportional $\frac{3}{2}\bar{J}$ ist. Die Richtung von N' ist jedoch eine andere wie die von N. Wir erkennen aus Fig. 185, daß sich N nach N' gedreht hat. Der eingezeichnete Pfeil gibt also die Drehrichtung des Ständerfeldes, beziehungsweise die Drehrichtung des Läufers an.

Es läßt sich nun leicht nachweisen, daß dieser Drehsinn, der in Fig. 185 nach links gerichtet erscheint, umkehrbar ist, wenn wir zwei beliebige Windungsebenen des Ständers des Motors, z. B. *II* und *III* untereinander vertauschen. Wir führen diese Vertauschung in Fig. 186

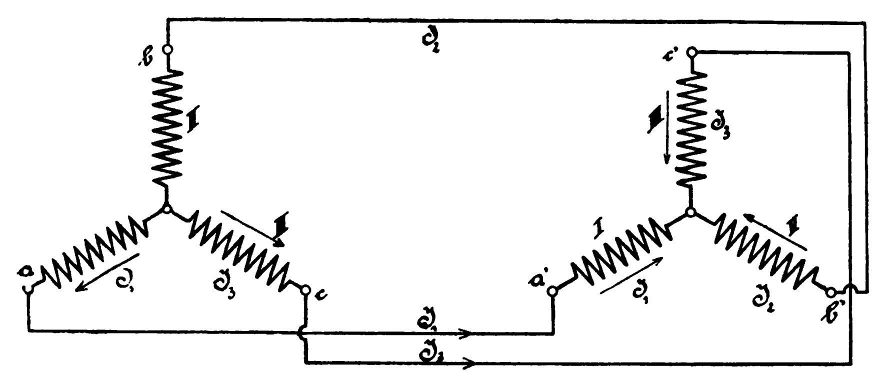


Fig. 186. **Stromverlauf im Motor und Generator bei Rechtslauf des Motors. Pfeile bei *b II* nach oben.**

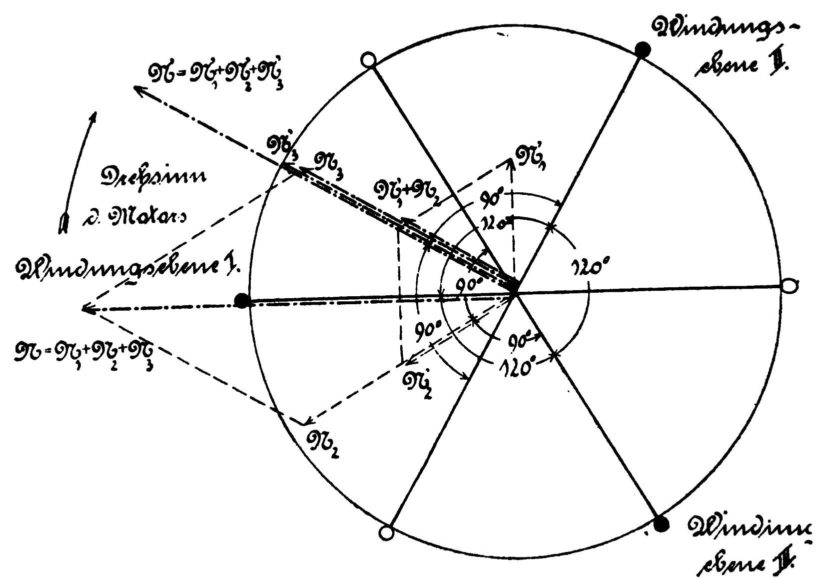


Fig. 187. **Bestimmung der Richtung und Größe des Drehfeldes bei Rechtslauf.**

durch und bilden wieder die Einzelfelder N_1, N_2, N_3 und N_1', N_2' und N_3', welche die Resultierenden N und N' ergeben. Infolge der Vertauschung der Windungsebenen *II* und *III* ergibt sich nun ein nach rechts gerichteter Drehsinn des Feldes und daher auch des Läufers. Um

die Vertauschung der zwei Windungsebenen beziehungsweise der zwei Phasen *II* und *III* hervorzubringen, haben wir einfach die Schaltung statt nach Fig. 183 nach Fig. 186 auszuführen, d. h. Klemme K_2 statt mit K_2', wie in Fig. 162, mit K_3' und K_3 statt mit K_3' mit K_2' zu verbinden. Es läßt sich mit Hülfe der Darstellungsweisen in Fig. 185 und 187 auch der Nachweis erbringen, daß es ganz gleichgültig ist, welche von den zwei zu vertauschenden Phasen des Motors zur Umkehrung der Drehrichtung herangezogen werden. Das heißt, wir können, indem wir zwei ganz beliebige Zuführungsdrähte der drei zum Motorständer führenden Leitungen untereinander vertauschen, den Drehsinn des Motors immer umkehren.

Bevor man den Umschalter umlegt, muß der Anlasser vor den Anker geschaltet werden. Umschaltung und Anlaßvorrichtung vereinigt man häufig in eine Vorrichtung, so zwar, daß, wenn man den Schalthebel umlegt, erst die Umsteuerungs- und dann erst die Anlaßvorrichtung in Tätigkeit tritt.

Die Umschaltungen finden nur in jenem Teile des Motors statt, welchem von außen Wechselstrom zugeführt wird. Durch Umschaltungen im induzierten Teil (Läufer) eines Induktionsmotors oder in dem von Gleichstrom erregten Magneten eines Synchronmotors kann man die Drehrichtung nicht umkehren, denn für die Drehrichtung des Läufers ist immer die Drehrichtung des Drehfeldes entscheidend.

VIII. Kapitel.

Regulierung der Geschwindigkeit von Drehstrommotoren.

136. Regulierung der Geschwindigkeit von Drehstrommotoren. Die Umdrehungszahlen der Wechselstrommotoren sind von der Umdrehungszahl der Primärmaschine abhängig. Mittel zur Erreichung der Änderung der Umdrehungszahl sind:

1. Änderung der Umdrehungszahl der Primärmaschine. Die Umdrehungszahl des Drehstrommotors ändert sich in demselben Verhältnisse wie die Umdrehungszahl der Primärmaschine. Dieser Fall kann praktisch nicht angewendet werden, weil fast immer Motoren und außerdem Lampen an dieselbe Maschine geschaltet sind. Es würde deshalb gleichzeitig an sämtlichen Motoren die Umdrehungszahl geändert, und außerdem müßten Schwankungen in der Beleuchtungsstärke auftreten.

2. Änderung der Polzahl des Motors durch eine entsprechende Wicklung. Ein zweipoliger Motor z. B. läßt sich leicht so wickeln, daß man denselben auf einen vier-, sechs- oder acht-

und mehrpoligen Motor umschalten kann. Die Mängel dieser Regulierung sind:

a) Die Wicklung wird verwickelt.

b) Man kann sowohl die Polzahl des Ständers als auch die Polzahl des Läufers durch einen Umschalter ändern. Man erreicht den angestrebten Zweck im ersten Falle nur bei Kurzschlußankern, also bei Motoren von rund $^1/_2$ *PS* höchster Leistung. Bei Läufern mit Schleifringen wäre zur Erreichung desselben Zweckes in diesem Falle eine Vermehrung der Anzahl der Schleifringe erforderlich. Die Österr. Schuckert-Werke haben das österr. Patent Nr. 9440 auf Polumschalter im Läufer.

Die Änderung der Polzahl des Motors wird praktisch zumeist angewendet.

3. Verminderung der Umdrehungszahl durch einen Anlaßwiderstand im Läufer bei Motoren mit Schleifringläufern. Dieser Vorgang entspricht der Regulierung der Umdrehungszahl bei Gleichstrommaschinen durch Vorschalten von Widerstand vor die Ankerwicklung. Diese Regulierung bedingt wohl einen Verlust, derselbe dauert jedoch nur während der Dauer der Regulierung, bei normalem Betriebe ist der Widerstand kurzgeschlossen.

4. Methode Steinmetz. Bei dieser Methode werden zwei Motoren in Verkettung (doppelte Schaltung, Konkatenation, Kaskadenschaltung) verwendet. Verbindet man von zwei Induktionsmotoren den sekundären Stromkreis des ersten Motors mit dem primären des zweiten Motors, so wirkt die zweite Maschine als Motor mit der von dem sekundären Stromkreise der ersten Maschine erhaltenen *EMK* und Frequenz. Die erste Maschine wirkt als ein gewöhnlicher Wechselstromtransformator. Der eine Teil der übertragenen primären Leistung wird in sekundäre elektrische Leistung zur Speisung der sekundären Maschinen und der andere Teil in mechanische Arbeit verwandelt. Ein System verketteter Motoren mit kurzgeschlossener sekundärer Wicklung des zweiten Motors nähert sich dem halben Synchronismus gerade so, wie der gewöhnliche Induktionsmotor dem Synchronismus. Steigt die Belastung, so wächst seine Schlüpfung unter halbem Synchronismus. Verkettete Induktionsmotoren verteilen ihre Geschwindigkeit so, daß sich die Summe der Geschwindigkeiten beim Leerlauf dem Synchronismus nähert.

IX. Kapitel.

Anlasser für Wechselstrommotoren.

137. Allgemeines. Anlasser für Gleich- und Wechselstrom haben den Zweck, Motoren beim Ingangsetzen vor Erreichung der regel-

rechten Umdrehungszahl von zu starkem Strom zu schützen. Nur ganz kleine Motoren können ohne Anlasser anlaufen, weil dieselben nur geringe Ströme erfordern. Man unterscheidet:

1. Einfache Anlasser ohne Umsteuerung für Gleich-, Wechsel- und Drehstrommotoren. Dieselben werden entweder aus einem Widerstandsmaterial (Draht, Blechstreifen) hergestellt oder es sind Flüssigkeitsanlasser. Die Umsteuerung dient zur Umkehrung der Drehrichtung.

2. Wendeanlasser, das sind Anlasser mit Umsteuerung (§ 134). Daher gehören auch die Kontroller, ähnliche Vorrichtungen, wie wir sie früher (II. T., 3. B., S. 104) kennen gelernt haben.

3. Selbsttätige Anlasser ohne und mit Umsteuerung für Gleich- und Wechselstrom.

In folgendem sollen vorwiegend nur die einfachen Anlasser ohne Umsteuerung aus Drähten oder Blechen und die Flüssigkeitsanlasser und andere Schaltungen beschrieben werden, welche man anstatt der Anlasser verwendet.

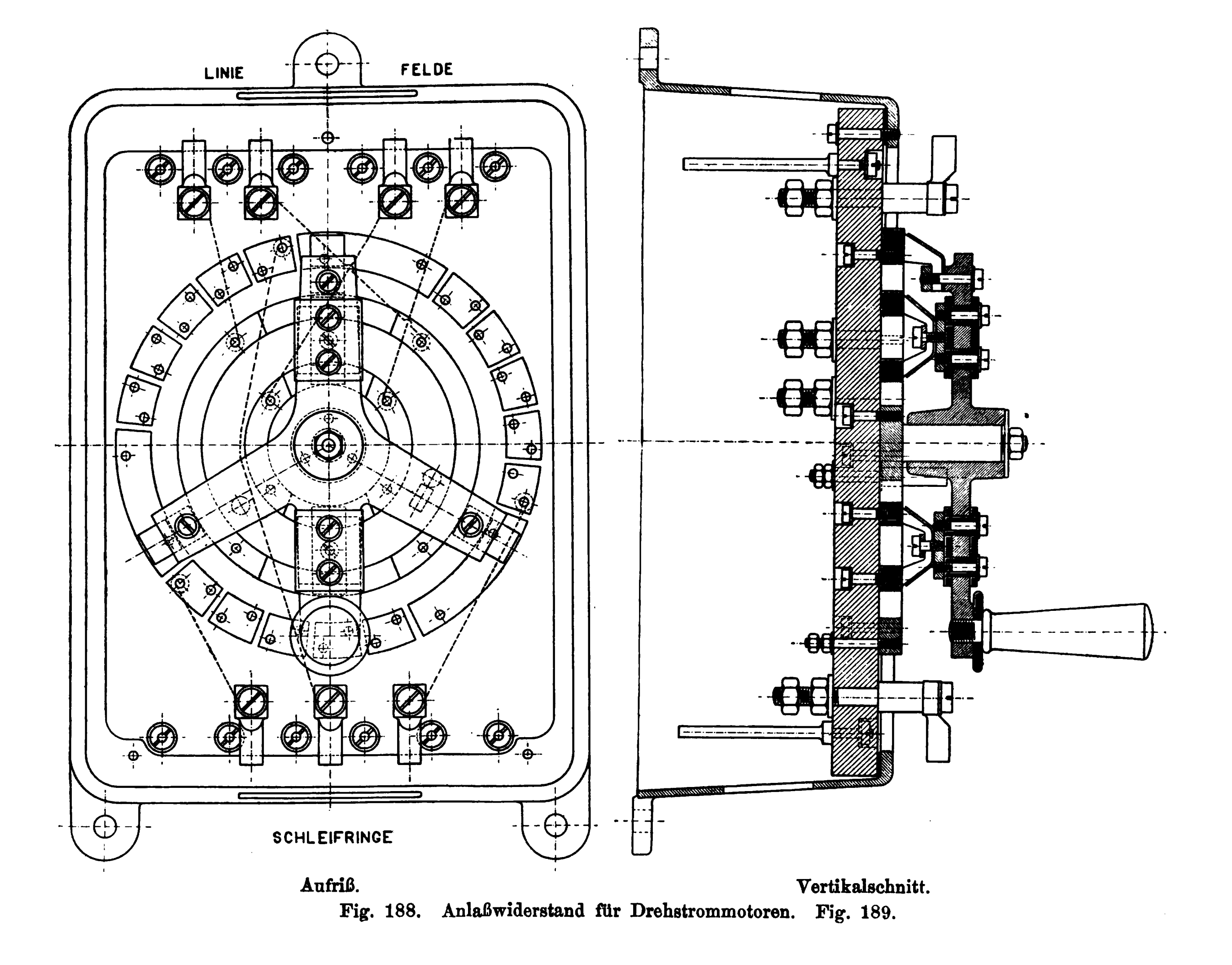
Die Schaltungen der Anlaßwiderstände zeigen die Figuren 150 bis 152. Beim Anlaufen ist der Gesamtwiderstand eingeschaltet. Mit zunehmender Umdrehungszahl wird immer mehr Widerstand ausgeschaltet und endlich schließt man den Anlasser kurz, wenn der Motor die regelrechte Umdrehungszahl erreicht hat. Während des Betriebes sind demnach die Widerstände kurzgeschlossen und tilgen keine Leistung. Beim Abstellen des Motors wird der Widerstand nach und nach eingeschaltet und schließlich unterbrochen. Der Anlasser tritt also immer nur kurze Zeit in Tätigkeit und, um denselben nicht zu groß zu gestalten, kann man ihn stark beanspruchen. Während der kurzen Zeit wird die Erwärmung nicht zu groß. Hat man Widerstände dauernd einzuschalten, z. B. behufs Regulierung der Umdrehungszahl, so kann die Beanspruchung nicht so groß gewählt werden und es müssen daher die Widerstände reichlicher bemessen sein. Bezüglich der Widerstände aus einem Widerstandsmaterial sei auf eine frühere Stelle (I. T., 1. B., S. 20) verwiesen. Die Abmessungen des Widerstandes werden bedeutend geringer, wenn man das Widerstandsmaterial (Drähte oder Blechstreifen) völlig abgeschlossen in Wasser oder in Öl stellt. Dann wird dem Widerstande die Wärme rasch entzogen und die ganze Oberfläche des Widerstandsgefäßes dient als Wärmeableiter. Der Widerstand kühlt sich demnach sehr rasch ab. Die Stromdichte (Anzahl der Ampère für 1 mm^2) kann dann bis zehnmal so groß gewählt werden als in der Luft, d. h. man kann zehnmal so viel Ampère für 1 mm^2 wählen als bei Luft.

Anlasser im primären Stromkreise sind in der Regel unvorteilhaft und nur dann zu verwenden, wenn die Spannung im Netze sonst stark beeinflußt wird. Man kann anstatt dieser Vorrichtungen stets Ankeranlasser verwenden, außer bei Motoren mit Kurzschlußankern. Bei Anlassern im Ständer vermindert sich der Anlaufstrom proportional der Klemmenspannung, dagegen wird das Anzugsmoment proportional dem Quadrate der Klemmenspannung verringert. Die Anlasser im Anker sind demnach in Bezug auf Wirkungsgrad und Anzugsmoment vorteilhafter als Anlasser vor der Ständerwicklung. Die Widerstände im Ankerstromkreise steigern das Anzugsmoment und verringern die Anlaufstromstärke wesentlich. Bei Anlassern im Anker kann die sekundäre Klemmenspannung niedriger, also ungefährlicher sein als die primäre, so daß eine gute Isolation des sekundären Anlassers leichter zu erreichen ist. Statt der Widerstände kann man auch die Selbstinduktion des Ankers verringern, indem man Kapazität einschaltet. Dann wird auch der Leistungsfaktor erhöht. Brown, Boveri & Co. bauen zu diesem Zwecke abgestufte Ankerflüssigkeitskondensatoren. Ein Anlasser muß bezüglich seiner Bauart folgende Anforderungen erfüllen.

1. Der Anlasser darf nicht plötzlich ausschaltbar sein. Das Einschalten muß erst langsam, dann rasch erfolgen.

2. Das Ausschalten muß möglichst rasch vorgenommen werden können. Wenn das Widerstandsmaterial nicht für Dauereinschaltung bemessen ist, so muß eine dauernde Zwischenstellung zwischen Ein- und Ausschaltestellung ausgeschlossen sein.

138. Einfacher Anlasser ohne Umsteuerung aus Widerstandsmaterial (*R*, Fig. 151 u. 152). Da bei jeder Läuferwicklung drei Phasen vorhanden sind, könnte man in jeder Phase einen gewöhnlichen Rheostat (I. T., 1. B., S. 20) verwenden. Die folgende Vorrichtung ist eine Vereinigung dreier solcher Rheostate, welche durch eine dreiarmige Kurbel gleichzeitig reguliert werden. Die Handhabung der drei Rheostate geschieht also gemeinsam und Einschaltung, Ausschaltung und Kurzschluß erfolgen also gerade so wie bei den Rheostaten. Der in den Figuren 188 und 189 wiedergegebene Anlasser für Drehstrommotoren mit Feldeinschaltung bis 510 Volt Primärspannung der Vereinigten Elektrizitäts-Aktiengesellschaft in Wien besteht wesentlich aus einer Kontaktbahn, aus Bürsten und aus Widerständen. Die Kontaktbahn zerfällt in drei Abteilungen (für jede Phase eine). Jede Abteilung (jeder Rheostat) enthält fünf Kontakte mit je vier Stufen von Widerständen und einem Ruhekontakt aus Stabilit. Die drei Abteilungen sind auf einer gemeinschaftlichen Marmorplatte befestigt. An den Hebel, welcher die Bürsten trägt, schließt zugleich der gemeinschaftliche Leiter (Null-



Aufriß. Vertikalschnitt.

Fig. 188. Anlaßwiderstand für Drehstrommotoren. Fig. 189.

leiter) an, wenn ein solcher überhaupt vorhanden ist. In der gezeichneten Stellung befindet sich der Hebel auf dem Ruhekontakte, d. h. der Anlasser ist stromlos. Wird der Hebel durch Drehen im Sinne des Uhrzeigers auf die ersten Kontakte der Rheostate gestellt, so wird durch die beiden inneren Kontaktringe das Feld unmittelbar unter Strom gesetzt und der gesamte Widerstand, welcher an die Schleifringe des rotierenden Teiles durch Bürsten anschließt, eingeschaltet. Beim Vorwärtsdrehen des Hebels im Sinne des Uhrzeigers werden die Widerstände immer kleiner und schließlich Null; dann läuft der Motor mit kurzgeschlossenem Anker. Fig. 190 gibt das Schaltungsschema

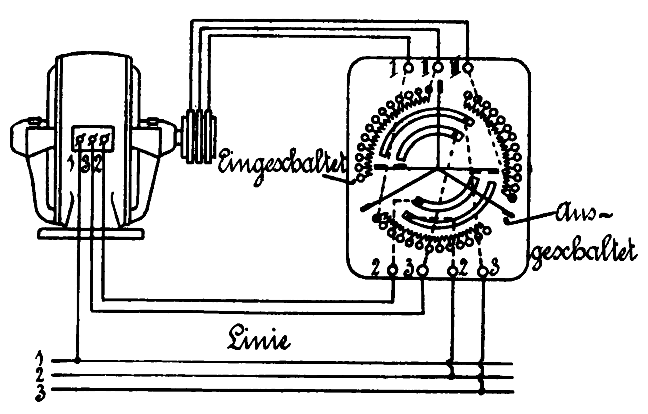


Fig. 190. Schaltung des Anlassers eines Drehstrommotors.

des obigen Anlassers wesentlich wieder. Von den drei Schleifringen des Motors führen drei Leitungen zu den Klemmen *I II III.* Diese Klemmen sind mit den Kurzschlußkontakten der drei Rheostate verbunden. Steht die Kurbel auf diesen Kontakten, so ist der Anlasser kurzgeschlossen. Die drei Geraden 1, 2 und 3 stellen die Linie dar, aus welcher der Dreiphasenstrom entnommen wird. Aus dem Leiter 1 tritt der Strom unmittelbar bei der Klemme 1 in den Motor ein. Die Leiter 2 und 3 der Linie werden durch den Schalter mit dem Motor verbunden, und zwar durch Vermittlung der in den Figuren ersichtlichen Ringe und dem wagrecht stehenden Kurbelteil, Fig. 190. Die zwei Leiter 2 und 3 der Linie einerseits und die zwei Leiter, welche von den Klemmen 2 und 3 des Motors kommen, anderseits, führen zum Schalter und sind an die Schleifkontakte angeschlossen. Dreht man die Kurbel im Sinne des Uhrzeigers, so verbindet der jetzt wagrecht liegende Teil der Kurbel die Schleifkontakte untereinander, so daß die Ständerwicklung eingeschaltet wird. Gleichzeitig schalten sich an den äußeren Kontakten die ganzen Widerstände ein. Man ersieht es aus

Fig. 190 und noch rascher aus Fig. 152 bei *R*, daß in jeder Phase zwei Rheostate hintereinander geschaltet sind. Dreht man die Kurbel im Uhrzeigersinne weiter, so wird immer mehr und mehr Widerstand ausgeschaltet, bis schließlich die Hebel auf den Kurzschlußkontakten stehen und der Anlasser (alle drei Rheostate) erscheint kurzgeschlossen. Die Figur 190 zeigt auch, wo die Hebel bei aus- und eingeschaltetem Anlasser stehen müssen. Es sei noch hervorgehoben, daß die Figuren 188 und 189 einerseits und 190 anderseits nur wesentlich übereinstimmen, während tatsächlich die Stellung der Hebel und der Schleifringe geändert erscheint.

Der in Fig. 191 wiedergegebene Anlasser der Österreichischen Schuckert-Werke hat wesentlich dieselbe Einrichtung bezw. Schaltung wie der zuletzt beschriebene. Auf einem Kasten ist die Kontaktbahn samt Kurbel aufgebaut. In dem Kasten befinden sich die Widerstände.

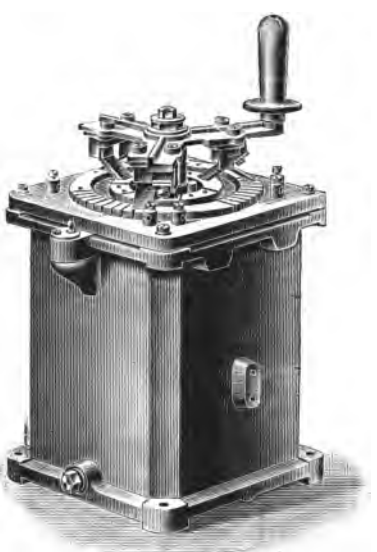


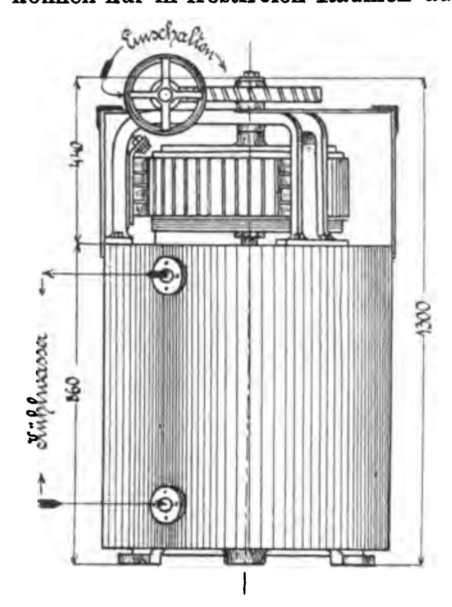
Fig. 191. Anlasser der Österreichischen Schuckert-Werke.

Fig. 192 veranschaulicht einen Kollektoranlasser für große Drehstrommotoren der Helios E.-A.-G. in Köln-Ehrenfeld. Dieser Anlasser ist ebenfalls so geschaltet wie der in den Figuren 188 bis 190 dargestellte. Die Kontaktbahn ist bei dem Kollektoranlasser als Kollektor ausgebildet, also gerade so aufgebaut, wie der Kollektor einer Gleichstrom-Dynamomaschine (I. T., 2. B., S. 156). Bei letzterem sind die Kollektorteile an die Ankerwicklung, beim Kollektoranlasser dagegen an die Widerstände angeschlossen.

Die Regulierung erfolgt von Hand aus mit Hülfe eines Schneckenantriebes. Um die Widerstände stark beanspruchen zu können ist eine Wasserkühlung vorgesehen.

139. Flüssigkeitsanlasser. Die wichtigsten Vorteile der Flüssigkeitsanlasser sind: Billigkeit, gedrungener Zusammenbau, Gestattung eines allmählichen Einschaltens und raschen Ausschaltens, Stromunterbrechung auf der Oberfläche ohne nachteilige Funkenbildung. Sie erscheinen insbesondere für stationäre Zwecke vorteilhaft. Bei fahrbaren Motoren werden dieselben deshalb seltener verwendet, weil dann die Flüssigkeit verschüttet werden kann. Diese Anlasser sind auch unter

der Flüssigkeit kurzschließbar, ehe ein metallischer Kurzschluß durch den Schalter erfolgt. Letzteres kann dadurch geschehen, daß man auf den Boden eine Schicht Quecksilber gießt. Die Flüssigkeitswiderstände können nur in frostfreien Räumen aufgestellt werden und erfordern eine sorgfältige Wartung. Als Füllflüssigkeit verwendet man zumeist $^1/_2$ bis 1 *kg* Soda auf 1 *l* Wasser. Zur Vermeidung des Auskristallisierens der Soda wird der obere Rand des Troges, in welchem die Flüssigkeit steht, mit mineralischem Fett (z. B. Vaseline) eingefettet. Die verdunstete Flüssigkeit ist rechtzeitig zu ersetzen. Die Gefäße dieser Anlasser bestehen entweder aus Gußeisen oder aus mit Blech ausgekleidetem Holz. Die Platten bestehen aus Schmiedeeisen. Das Einschalten der Platten erfolgt entweder mit steilgängiger Spindel oder Zahnstange und Handrad oder mittels eines Handhebels. Zur Dämpfung eines zu raschen oder unbeabsichtigten Einschaltens ist das Plattengewicht durch ein Gewicht ausbalanciert. Demselben Zwecke dienen auch eine Ölbremse oder andere Vorrichtungen. Als Ersatz für die Flüssigkeit kann auch Flockengraphit verwendet werden. Bei Dreiphasenstrom sind drei Platten vorhanden, für jede Phase eine Platte.



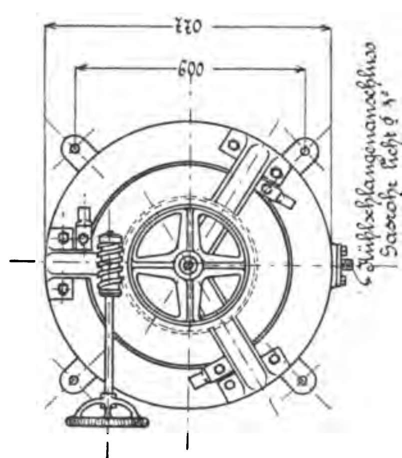


Fig. 192. Kollektoranlasser.

Bei Anlassern im Läufer sind die drei gußeisernen Gefäße untereinander metallisch verbunden oder es ist nur ein Gefäß vorhanden. Die drei Leitungen führen in jedem Falle von den drei Schleifringen an die drei Platten. Bei Anlassern im Ständer sind die drei Gefäße voneinander isoliert und es finden zwei Schaltungen Verwendung: 1. Der Strom fließt durch die drei Leitungen des Netzes, durch einen dreipoligen Ausschalter an die drei gußeisernen Gefäße, durch die Flüssigkeit zu den drei Platten und von diesen in die Ständer-

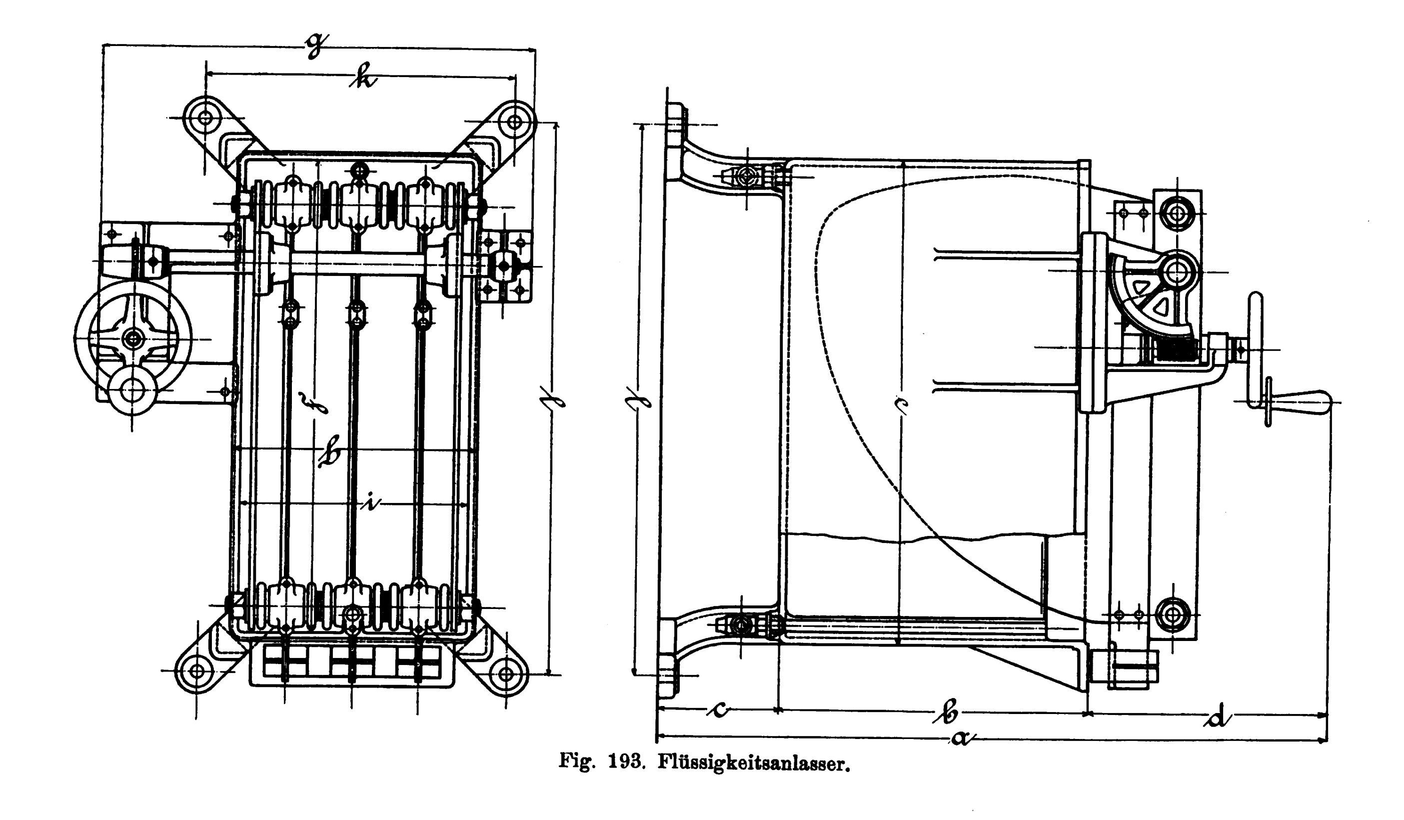


Fig. 193. Flüssigkeitsanlasser.

wicklung. 2. Der Strom fließt aus dem Netze durch einen dreipoligen Ausschalter in die Ständerwicklung, zu den drei Gefäßen und zu den drei untereinander verbundenen Platten. Die Ständerwicklung erscheint somit durch den Anlasser verkettet (Sternschaltung). In diesem Falle können die Platten geerdet werden.

Treten die drei Platten aus den Flüssigkeiten heraus, so sind die drei Phasen unterbrochen. Fig. 193 gibt ein Bild des Flüssigkeitsanlassers der Maschinenfabrik Örlikon in Örlikon wieder.

140. Bedienung der Anlasser. Die Bedienung der Anlasser umfaßt die folgenden Punkte:

1. Das Einschalten muß langsam erfolgen. Bei raschem Einschalten bilden sich an den Kontaktstücken, bei Gleichstrommotoren auch am Kollektor des Motors, Funken und im Netze schwankt die Spannung.

2. Das Ausschalten darf beliebig rasch, jedoch nicht zu langsam vorgenommen werden.

3. Der Schalthebel darf nicht andauernd auf einem Kontakte zwischen Anfangs- und Endstellung stehen bleiben, weil sonst die Widerstände verbrennen. Eine Ausnahme bilden Widerstände für Dauereinschaltung.

4. Kontakthebel und Schleiffedern müssen ihre Form behalten und sehr gut aufliegen.

5. Ist ein Funkenlöscher vorhanden, so muß sich der Kontakt desselben öffnen, solange der Anlasserhebel den letzten Kontakt noch nicht verlassen hat.

5. Alle Teile der Anlasser sind gründlich zu reinigen, z. B. die Kontaktstücke, Luftzwischenräume, Isolationen u. s. w. Die Anlasser sind vor Schmutz und Nässe zu schützen. Schlechte Kontakte sind rechtzeitig zu schmirgeln, damit sie nicht abgefeilt werden müssen.

7. Lose Schrauben sind nachzuziehen.

8. Gleitflächen müssen regelmäßig geölt werden.

9. Bei Flüssigkeitsanlassern muß die ausgeschaltete Platte zuverlässig stehen bleiben.

10. Bei Flüssigkeitsanlassern muß die Flüssigkeit rechtzeitig nachgefüllt werden.

Von dem richtigen Einschalten der Anlasser hängt die Lebensdauer derselben und die Wirtschaftlichkeit der Anlage ab. Die Anlasser können auch selbsttätig durch einen kleinen Hülfsmotor, eine Ausklinkvorrichtung mit Hemmwerk, eine Ölbremse oder ein Zentrifugalpendel, welche der Hauptmotor antreibt, in Tätigkeit gesetzt werden. Bei großen Motoren fallen auch die Anlasser groß aus; dann treibt man dieselben elektrisch an.

141. Schaltungen, welche Anlasser ersetzen. Die Siemens & Halske A.-G. verwendet anstatt eines Anlassers für Motoren bis zu

100 *PS* eine sogenannte Gegenschaltung. Durch diese Schaltung werden Schleifringe und Bürsten vermieden. Solche Motoren sind beinahe so einfach wie Motoren mit Kurzschlußankern, sie besitzen jedoch nicht deren Nachteile. Die einzelnen Ankerspulen sind nicht ganz gleich; sie sind zu Anfang gegeneinander geschaltet. Es entsteht demnach im Anker eine geringe *EMK* und daher auch ein geringer Anlaufstrom. Dann werden die Spulen sämtlich kurzgeschlossen. Die Gegenschaltung kann nicht allein durch verschiedene Windungszahlen, sondern auch durch Versetzung zweier Wicklungssysteme am Ankerumfange erreicht werden. Andere Gegenschaltungen wurden von der A. E.-G. und F. Niethammer erdacht. Der Anlaßwiderstand kann auch durch Anwendung eines Doppelmotors in Kaskadenschaltung (§ 136 unter 4) vermieden werden. Man verwendet dann als Schaltvorrichtung einen sogenannten Tandem-Parallelkontroller (U. S. P. 568.458, 31. August 1895).

142. Berechnung eines Anlaßwiderstandes für den früher (S. 232) berechneten Drehstrommotor. Bei der Bestimmung der Größe des vor den Läufer zu schaltenden Anlaßwiderstandes wollen wir von der Annahme ausgehen, daß beim Einschalten des Motors (Stillstand des Läufers) der im Läufer induzierte Strom die Größe des beim normalen Betriebe in demselben fließenden nicht überschreite. Der Motor zieht dann mit dem normalen Drehmoment an, wie ja ohneweiters aus dem Heylandschen Diagramme (S. 210) hervorgeht. Der normale Läuferstrom i_2'' betrug nach § 129 177 Ampère. Dabei haben wir im Läufer pro Phase eine Spannung von $i_2'' . w_2$, wenn w_2 den Ohmschen Läuferwiderstand einer Phase bedeutet. w_2 beträgt nach § 125 0·00345 Ohm. Wir erhalten daher für $i_2'' . w_2$ den Wert $i_2'' . w_2 = 177 . 0{\cdot}00345 = 0{\cdot}61$ Volt. Die Umdrehungszahl des Läufers beträgt dabei, entsprechend einer synchronen Umdrehungszahl von $n_1 = 1000$ Umdrehungen in der Minute, sowie einer prozentualen Schlüpfung von 3·8% (§ 129), $1000 - \frac{3{\cdot}8}{100} . 1000 = 962$ Umdrehungen in der Minute. Dieser Verlust an Umdrehungen von 38 Umdrehungen in der Minute ist es aber, welcher die im Läufer induzierte Spannung $i_2'' . w_2 = 0{\cdot}61$ Volt hervorruft. Beim Anlauf haben wir 100% Schlüpfung, da ja dann der drehende Anker stillsteht. Bezeichnen wir mit W_x die Größe: Anlaßwiderstand (einer Phase) + Läuferwiderstand (einer Phase), so muß, da wir auch in diesem Falle nur 177 Ampère im Läufer zulassen wollen, $i_2'' . W_x = \frac{1000}{38} . i_2'' . w_2$ sein, denn bei Anlauf werden ja die Läuferstäbe von den Kraftlinien mit einer Ge-

schwindigkeit geschnitten, welche der synchronen Umdrehungszahl proportional ist. Wir erhalten daher auch

$$W_x = \frac{1000}{38} \cdot w_2 = \frac{1000}{38} \cdot 0{\cdot}00345 = 0{\cdot}091 \text{ Ohm.}$$

Diese Betrachtung gilt aber nur so lange, als wir den Anlaufsstrom von der Größe des normalen Betriebsstromes wählen. Wir erhalten nun den vor den Läufer zu schaltenden Widerstand R aus:

$$R = W_x - w_2 \text{ zu } 0{\cdot}091 - 0{\cdot}00345 = 0{\cdot}08755 \text{ Ohm.}$$

Die Abstufungen lassen wir nach einer geometrischen Reihe erfolgen. Damit erreichen wir, daß die Stromstöße, die beim Abschalten einer Stufe hervorgerufen werden und die dem Motor die Beschleunigung erteilen, von Kontakt zu Kontakt immer innerhalb derselben Grenzen bleiben.

Haben wir auf Kontakt 1 den Widerstand w_2 (R kurzgeschlossen), so muß, um der geometrischen Reihe Genüge zu leisten, auf Kontakt 2 der Widerstand $q \cdot w_2$, auf Kontakt 3 der Widerstand $q \cdot q \cdot w_2 = q^2 \cdot w$, auf Kontakt k schließlich der Widerstand $q^{k-1} \cdot w_2$ vorgeschaltet sein, der dann gleich $R + w_2 = W_x$ ist. Aus $q^{k-1} \cdot w_2 = W_x$ erhalten wir den Faktor q zu:

$$q = \sqrt[k-1]{\frac{W_x}{w_2}} .$$

Wählen wir sieben Kontakte an der Vorrichtung, so wird:

$$q = \sqrt[6]{\frac{0{\cdot}091}{0{\cdot}00345}} = 1{\cdot}73.$$

Wir haben also im sekundären Kreise:

Auf Stufe	1 (Kurzschluß):		0·00345 Ohm.			
„	„	2 . . .	1·73 . 0·00345	„	= 0·00596	Ohm.
„	„	3 . . .	$(1{\cdot}73)^2$. 0·00345	„	= 0·0103	„
„	„	4 . . .	$(1{\cdot}73)^3$. 0·00345	„	= 0·0179	„
„	„	5 . . .	$(1{\cdot}73)^4$. 0·00345	„	= 0·031	„
„	„	6 . . .	$(1{\cdot}73)^5$. 0·00345	„	= 0·0536	„
„	„	7 . . .	$(1{\cdot}73)^6$. 0·00345	„	= 0·091	= W_x.

IV. Abschnitt.

Generatoren und Motoren.

I. Kapitel.

Allgemeine Gesichtspunkte beim Entwurf von Gleichstrom- und Wechselstromgeneratoren und -Motoren.

143. Entwurf von Generatoren und Motoren. Ganz allgemein gelten, wie Heyland[1]) in seiner Arbeit ausführlich auseinandersetzt, sowohl für Generatoren und Motoren jeder Stromart folgende Grundsätze:

Die Leistung ist, eine bestimmte Polwechselzahl und Windungszahl des Ankers vorausgesetzt, proportional dem Produkte Spannung × Strom.

Da nun die Spannung proportional dem Felde ist, ist auch die Leistung proportional dem Produkte Feld × Strom. Setzen wir zunächst in den Zähnen eine gewisse Kraftliniendichte und im Ankerkupfer eine bestimmte Stromdichte voraus, so wird das Feld N um so größer, je größer die Zahnbreite ist, der Strom J dagegen um so größer, je breiter die Nuten gemacht werden.

Das Produkt Feld × Strom $= N \times J$ wird, da ja die Summe von Zahn- und Nutenbreite durch die Nutenteilung gegeben ist, am größten, wenn die Zahnbreite gleich der Nutenbreite ausgeführt wird. Um also den Generator beziehungsweise den Motor möglichst auszunützen, ist die Nutenbreite ungefähr gleich der halben Nutenteilung zu machen.

Die Kraftliniendichte in den Zähnen nimmt man möglichst hoch an. Man geht bei Gleichstrommaschinen bis zu höchstens 25.000 Kraftlinien für 1 cm^2. Bei Drehstromgeneratoren und -Motoren wird man wegen der hohen Wechselzahl (gewöhnlich 80 bis 100 in der Sekunde) diesen Wert im allgemeinen nicht zulassen, um die Eisenverluste und die damit verbundene Erwärmung der Ankerzähne nicht zu hoch zu erhalten. Die Zahnsättigung im Läufereisen eines Drehstrommotors kann jedoch ohneweiters so hoch gesteigert werden, da hier nur die der Schlüpfung entsprechende Wechselzahl (S. 189) für die Eisenverluste in Betracht kommt. Mit der Sättigung im Luftraum geht man höchstens bis 14.000 Kraftlinien für 1 cm^2. Bei Drehstrommotoren läßt man im Luftraume eine höchste Sättigung von 3500 bis 5500 Kraftlinien für 1 cm^2 bei 50 Perioden zu.

[1]) Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, S. 293 ff.
Siehe auch Max Breslauer: Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 469.

Den Polbogen wählt man bei Generatoren jeder Art gewöhnlich 0·7 bis 0·8 der Polteilung. Das Feld N ergibt sich dann aus dem Produkte: Polbogen $\times$ Ankerbreite $\times$ Luftsättigung. Unter Berücksichtigung einer der betreffenden Type entsprechenden Streuung und unter Zugrundelegung einer Sättigung von 15.000 bis 17.000 Kraftlinien für 1 cm^2 im Polschenkel erhält man dann den Querschnitt des letzteren.

Um möglichst an Erregerkupfer zu sparen, ist die Windungslänge der Erregerspulen auf das möglichst kleinste Maß zu beschränken. Das erreicht man, wenn man die Polschenkel quadratisch oder, was noch besser ist, kreisrund wählt. Die Polschuhe werden zweckmäßig ebenfalls quadratisch ausgeführt. Wählt man die Breite der Polschuhe nach rückwärts gleich der Polteilung $\left(\frac{\text{Umfang}}{\text{Polzahl}}\right)$, so erhält man ebenfalls günstige Verhältnisse.

Was nun die Gleichstrommaschinen anbelangt, so empfiehlt es sich im Interesse eines funkenlosen Ganges, die Selbstinduktion der Ankerspulen und der Nuten möglichst zu reduzieren, was durch Anwendung von breiten und offenen Nuten erreicht wird. Diese offenen Nuten bringen jedoch beim Vorbeiwandern am Polschuh, wenn der Luftspalt der Maschine im Verhältnis zur Nutenöffnung klein ist, Feldschwankungen in demselben hervor und es besteht die Gefahr, daß durch die dann entstehenden Foucaultströme die Polschuhe leicht stark erhitzt werden. Es empfiehlt sich daher, die letzteren zu unterteilen. Das Verhältnis von $\frac{\text{Ampèrewindungen des Ankers}}{\text{Ampèrewindungen für Leerlauf}}$ läßt man bei Gleichstrommaschinen häufig bis 1 und darüber gehen. Bei Drehstromgeneratoren kann man dieses Verhältnis jedoch nicht so hoch treiben, da sich dann namentlich bei induktiver Belastung zwischen Leerlauf und Vollbelastung (konstante Erregung vorausgesetzt) ein ganz bedeutender Spannungsabfall [1]) ergeben würde. Man geht hier in der Regel von 0·2 bis 0·3.

Mit Rücksicht auf das sogenannte Pendeln (II. T., 2. B., S. 389), das bei Parallelschaltung von Wechsel- und Drehstromgeneratoren auftritt, empfiehlt es sich nach Heyland in diesem Falle die Polschuhe nicht zu unterteilen, sondern massiv auszuführen. Aus diesem Grunde sind daher die Nuten des Ankers halb oder ganz geschlossen auszuführen, denn die massiven Eisenmassen der Polschuhe würden die bereits erwähnte Entstehung von Wirbelströmen nur begünstigen.

---

[1]) Arbeiten über den Spannungsverlust wurden bereits zitiert (S. 146).

Was endlich die Größe des Luftspaltes anbelangt, so ist dieselbe so auszuführen, daß der Quotient $\frac{\text{Ampèrewindungen des Ankers}}{\text{Ampèrewindungen für Leerlauf}}$ die bereits angegebenen Verhältniszahlen annimmt.

Wir haben bei der Theorie des Drehstrommotors gesehen, daß der Streufaktor, der ja von der Größe des Luftspaltes abhängt, und damit auch das Verhältnis $\frac{\text{Magnetisierungsstrom}}{\text{Kurzschlußstrom}}$ möglichst klein sein muß, damit der Motor nicht gleich bei einer geringen Überlastung aus dem Tritt fällt.

Aus diesem Grunde ist bei Drehstrommotoren (Induktionsmotoren) der Luftspalt so klein, als aus mechanischen Gründen nur möglich erscheint, zu halten. Je kleiner man den Luftspalt wählt, desto besser wird $\cos \varphi$. Mit der Vergrößerung des Luftspaltes steigt die Überlastungsfähigkeit und die Stabilität des Motors.

Die größte Dynamomaschine ist bisher jene der neuen Elektrizitätswerke der New-Yorker Hochbahn.[1]) Die Leistung dieser 40poligen Drehstromdynamo beträgt regelrecht 5000 und höchstens 7500 Kilowatt (rund 10.000 *PS*) bei 25 Perioden, 75 Umdrehungen, 11.000 Volt, 253 Ampère in einem Leiter bei induktionsfreier Belastung. Für Beleuchtung werden Frequenztransformatoren verwendet.

Abmessungen:

Durchmesser des feststehenden Teiles	13·487 *m*,
Durchmesser des umlaufenden Teiles	9·754 *m*,
Kranzbreite	1·359 *m*,
Fundamentbreite parallel zur Welle	3·124 *m*,
Luftzwischenraum einseitig . . .	19 *mm*,
Gewicht des rotierenden Teiles .	170 *t*,
Gesamtgewicht rund	400 *t*.

II. Kapitel.

Prüfung von Wechselstromgeneratoren.

144. Prüfung von Ein- und Dreiphasengeneratoren. [2]) 1. Aufnahme der Klemmenspannung bei gleichbleibender Umdrehungszahl und veränderlicher Erregung.

Diese Kurve wird bei offenem äußeren Stromkreis aufgenommen und werden als Abszissen die Erregerströme oder Erregerampèrewindungen und als Ordinaten die der betreffenden Umdrehungszahl (die während der

[1]) Zeitschrift des Ingenieur- und Architektenvereines in Wien, 1902, S. 649.

[2]) Siehe auch Friedrich Eichberg: Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 784.



ganzen Versuchsreihe gleich zu halten ist) entsprechenden Klemmenspannungen aufgetragen. Die erhaltene Klemmenspannungskurve stellt zugleich, da der äußere Stromkreis offen ist und daher ein Spannungsabfall durch Ohmschen Widerstand und Ankerrückwirkung nicht stattfinden kann, die Kurve der *EMK* dar.

2. Aufnahme der Kurzschlußcharakteristik.

Bei normaler und gleichbleibender Umdrehungszahl wird eine Versuchsreihe aufgenommen, bei welcher ein Stromanzeiger den äußeren Stromkreis kurzschließt. Mit entsprechend kleinem Erregerstrom, der allmählich gesteigert wird, beginnt die Versuchsreihe. Man geht mit der Erregung der Regel so weit, bis der Kurzschlußstrom das zwei- bis dreifache des normalen Betriebsstromes erreicht. Für die kurze Dauer des Versuches verträgt das die Wicklung des Generators, ohne Schaden zu leiden. Es ist vorteilhaft, so hoch zu gehen, um möglichst viele Punkte für die Kurzschlußcharakteristik zu erhalten. Abgelesen werden die Erregerströme, die man wieder als Abszissen aufträgt, so wie die Kurzschlußströme, die als Ordinaten aufzutragen sind. Die Kurzschlußstromkurve wird, solange die Erregerstromstärken nicht allzuhoch sind, geradlinig ausfallen.

Da die Kurzschlußstromstärke durch Änderung der Erregung auf das Zwei- bis Dreifache der regelrechten Stromstärke gebracht werden kann, so verwendet man sie zum Durchwärmen der Ankerspulen behufs Prüfung etwaiger Isolationsfehler.

3. Aufnahme des Belastungsstromes in Abhängigkeit vom Erregerstrom bei gleichbleibender Klemmenspannung.

Die Umdrehungszahl sowie die Klemmenspannung sind gleich zu halten und der Belastungsstrom ist durch Verändern des äußeren Widerstandes allmählich auf die normale Größe zu treiben. Naturgemäß muß dabei, um die Klemmenspannung gleich erhalten zu können, auch der Erregerstrom entsprechend gesteigert werden. Diese Versuchsreihe entspricht den Verhältnissen in der Praxis. Häufig kann man jedoch den Generator nicht voll belasten, da man einerseits nicht unnötigerweise große Energiemengen für ledigliche Probezwecke vergeuden will, anderseits hat man dieselben oft nicht zur Verfügung. Um nun auch in diesem Falle über das Verhalten des Generators bei den verschiedenen Belastungen im klaren zu sein, führt man nur die Versuche 1 und 2 durch. Aus der Versuchsreihe 2 kennt man die Erregerstromstärke und daher auch die Erregerampèrewindungen, die nötig sind, um den Belastungsstrom von der normalen Größe durch die Ständerwindungen zu treiben, während aus Versuchsreihe 1 die Ampèrewin-

dungen für die betreffende Spannung bezw. *EMK* der Maschine bei Leerlauf bekannt sind. Durch rechtwinklige Zusammensetzung dieser beiden Arten von Erregerampèrewindungen erhält man dann als Hypotenuse die Ampèrewindungen, welche für die normale Spannung und normale Stromstärke auf den Magnetschenkeln vorhanden sein müssen. Für eine kleinere Betriebsstromstärke als die normale hat man einfach in der Kurzschlußkurve den entsprechenden Wert des Erregerstromes aufzusuchen und ebenso zu verfahren. Diese rechtwinklige Zusammensetzung gilt für induktionsfreie Belastung. Bei induktiver Belastung sind die Erregerampèrewindungen, die aus der Kurzschlußkurve für den normalen Betriebsstrom entnommen werden, unter dem betreffenden Phasenverschiebungswinkel aufzutragen. Die Schlußseite des nunmehr schiefwinkligen Dreieckes entspricht dann den Erregerampèrewindungen, die für die normale Spannung und den normalen Strom beim Phasenverschiebungswinkel φ auf den Magnetschenkeln vorhanden sein müssen. Bei der Berücksichtigung des Ohmschen Spannungsabfalles ist zu berücksichtigen, daß derselbe in der Phase des Stromes liegend zur Klemmenspannung zu addieren ist. Diese Zusammensetzung der Ampèrewindungen entspricht dem Vorgange Rotherts.

4. Bestimmung des Wirkungsgrades aus elektrischer und mechanischer Leistung.

Der Wirkungsgrad G ist gleich:

$$G = \frac{\text{Elektrische Nutzleistung in Watt}}{\text{zugeführte mechanische Leistung in Watt.}}$$

Zur Bestimmung der Zählergröße dienen Strom- und Spannungszeiger. Ist die Belastung induktiv, so ist ein Wattzeiger zur Bestimmung der Nutzleistung einzuschalten. Die Messung der zugeführten mechanischen Leistung wird bei kleinen Generatoren in der Regel mittels Riemendynamometer bestimmt. Bei großen Generatoren sind die Indikatordiagramme der Dampfmaschine aufzunehmen, um die zugeführte mechanische Leistung zu bestimmen.

III. Kapitel.

Prüfung von Wechselstrommotoren.

145. Prüfung von Ein- und Dreiphasenmotoren.

1. Leerlaufsprobe.

Der Motor wird an die regelrechte Spannung angeschlossen und mittels Wattzeiger wird die zugeführte Leistung, mittels Stromzeiger und Spannungszeiger Strom und Spannung gemessen. Der Leistungs-

faktor $\cos\varphi$ für Leerlauf ergibt sich dann zu $\cos\varphi = \frac{\text{Watt}}{3\ \text{Volt. Ampère}}$ (S. 85). Der gemessene Strom heißt der Leerstrom des Motors und ist bei Dreiphasen- (und Zweiphasen-)Motoren etwas weniges größer als der Magnetisierungsstrom. Er unterscheidet sich von letzterem nur durch die kleine senkrecht zu ihm stehende Stromkomponente, die zur Deckung der geringen Verluste bei Leerlauf erforderlich erscheint. (Theorie der Drehstrommotoren, Seite 225.) Bei Einphasenmotoren ist der Leerstrom ungefähr doppelt so groß als der Magnetisierungsstrom.

2. Kurzschlußprobe.

Bei festgebremstem Läufer wird dem Ständer Spannung zugeführt, die man allmählich so weit steigert, bis der primäre Strom (Kurzschlußstrom) gleich dem zwei- bis dreifachen des regelrechten Primärstromes ist. Man geht aus dem Grunde so hoch, um möglichst viele Punkte für die Kurzschlußstromstärke, die man in Abhängigkeit von der Spannung aufträgt, zu erhalten. Die Kurve, die sich ergibt, weicht wenig von einer Geraden ab. Durch Verlängern derselben bis zur regelrechten (Betriebs-)Spannung des Motors erhält man den Kurzschlußstrom für die regelrechte Spannung. Mißt man gleichzeitig die zugeführten Watt und bestimmt $\cos\varphi_k$ (Phasenverschiebungswinkel zwischen primärem Kurzschlußstrom und Spannung) aus $\cos\varphi_k = \frac{\text{Watt}}{3\ \text{Volt. Ampère}}$, so ist man in der Lage, das Heylandsche Diagramm entwerfen zu können. Volt und Ampère verstehen sich dabei für eine Phase.

Auf Seite 245 ist die Konstruktion ausführlich auseinandergesetzt.[1]) Man ist also mit Hülfe der Leerlauf- und Kurzschlußprobe in den Stand gesetzt, das Verhalten des Motors für jeden beliebigen Betriebszustand von Leerlauf bis Kurzschluß beurteilen zu können. Alle übrigen Größen, wie: Drehmoment, Schlüpfung, Leistung und Phasenverschiebung, sind dann, wie bei der Theorie der Drehstrommotoren (S. 201) ausführlich auseinandergesetzt wurde, aus diesem Diagramme zu entnehmen. Zur Kontrolle kann

3. die Bremsprobe durchgeführt werden.

Alle elektrischen Größen, als: Strom, Spannung und Watt, werden gemessen, die abgegebene mechanische Nutzleistung wird abgebremst. Aus den Messungen[2]) erhalten wir irgend ein $\cos\varphi$ aus:

$$\frac{\text{Watt}}{3\ \text{Volt. Ampère}},$$

[1]) Bezüglich des Diagrammes für den Einphasenmotor sei verwiesen auf Friedrich Eichberg: Elektrotechnische Zeitschrift, 1899, S. 505, und 1900, S. 484.

[2]) Siehe auch Georg Stern: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 539.

den Wirkungsgrad G aus: $\frac{\text{Abgebremste Leistung in Watt}}{\text{zugeführte Watt}}$, das Drehmoment in Meterkilogramm aus $D = \frac{716\ P.S}{n}$, wenn n die Umdrehungszahl bedeutet. Die Messung der Schlüpfung geht auch mit der Messung der Umdrehungszahl Hand in Hand. Genaue Resultate bei Messung der letzteren erhält man weiters mittels der stroboskopischen und anderen Methoden. [1])

IV. Kapitel.

Störungen an elektrischen Maschinen.

Tabellarische Übersicht über Störungen an elektrischen Maschinen.[2])

146. Gleichstromdynamos und -Motoren.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhülfe
I. Funkenbildung am Kollektor oder an den Bürsten	1. Stark eingefressene Isolation zwischen zwei Lamellen	Unterbrechung einer zwischen den beiden Lamellen liegenden Ankerspule, tritt bisweilen am Kollektornocken auf, seltener auf dem Ankerkörper	Verlötung der Unterbrechungsstelle, falls dieselbe zugänglich ist; zuweilen völlige Neuwicklung des Ankers. Vorläufige Abhülfe durch Kurzschließen der beiden Lamellen
	2. u. 2a. Hüpfen der Bürsten, Brandspuren am Kollektor, bei Verwendung von Kohlenbürsten starkes Schwarzwerden	Unrunder schlagender Kollektor. Hervortreten der Isolation zwischen den Lamellen infolge ungleicher Härte des Materials, der Lamelle und der Isolation oder infolge ungenügender Festigkeit des Kollektors in sich (Lockerwerden der Druckringe)	Abdrehen. Abschmirgeln mit Karborundumpapier, bei starken Fällen Abdrehen. Bei Lockerwerden ist Demontage erforderlich

[1]) Rosenberg: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 246.
[2]) Ernst Schulz: Elektrotechnischer Anzeiger, 1902, S. 404.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhülfe
	3. Brandspuren zwischen zwei oder mehreren Lamellen bei verschraubten Ankern	Der Kontakt zwischen Ankerdraht und Kollektornocken ist ungenügend und bei verschiedenen Lamellen ungleich, daher verschiedene Spulenwiderstände und verschiedene Kommutierungsströme	Schrauben sorgfältig anziehen, Berührungsstellen (Drahtenden) blank machen; gelötete Anker sind immer vorzuziehen
	4. Zu hohe Umdrehungen bei normaler Spannung	Zu geringe Feldstärke, Überwiegen der Ankerrückwirkung	Einhalten der normalen Umlaufzahl
	5. Schlecht zentrierter Anker bei mehrpoligen Maschinen mit Parallelwicklung, zugleich anormale Erwärmung schon ohne Hauptstrom	Innere Ausgleichsströme wegen der Verschiedenheit der einzelnen Spulenspannungen, hervorgerufen durch den ungleichen Luftraum der Pole	Verbringen des Ankers in genau zentrische Lage zu den Polschuhen
	6. Starke Erhitzung oder völliges Kaltbleiben einer Magnetspule bei mehrpoligen Maschinen; zugleich anormale Erwärmung des Ankers	Kurzschluß in sich oder Überbrückung der Windungen einer Magnetspule, demnach Schwächung des Feldes in dem zugehörigen Pol, also unregelmäßiges Magnetfeld, daher Ausgleichsströme in der Ankerwicklung	Ausbesserung der schadhaften Magnetspule
	7. bis 11. Ohne Merkmal	Falsche Bürstenstellung. Überlastung. Anwendung schädlicher Kollektorschmiermittel. Schlecht eingeschliffene Kontaktfläche bei neuen Bürsten. Schlechtes Bürstenfabrikat	Abhülfe selbstverständlich

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhülfe
II. Ankererhitzung	1. Zu niedere Umlaufzahl bei normaler Spannung	Zu hohe Kraftliniendichte im Ankereisen, starke Verluste durch Hysteresis und Wirbelströme	Einhalten der normalen Umlaufzahl
	2. Erhitzung eines Teiles der Ankerwicklung nach wenigen Minuten. Man läßt die Maschine mit besonderer Erregung ohne Hauptstrom laufen, da sie sich gewöhnlich bei diesem Fehler nicht von selbst erregt. Bei Elektromotoren zeigt sich ferner eine zu hohe Umlaufzahl	Kurzschluß einer oder mehrerer Ankerspulen	Ausbesserung der Ankerwicklung
	3. Zu fest aufgepreßte Bürsten; allenfalls auch zu dicke Bürsten	Übertragung der Wärme vom Kollektor auf die Ankerwicklung	Abhülfe selbstverständlich
	4. Ungeeignetes Bürstenmaterial, zu harte Kohle, hartes Kupfergewebe u. dgl.	Wie vorstehend	Anwendung guter Bürsten
	5. Ferner bringt jede starke und andauernde Funkenbildung eine Erhitzung des Kollektors und des Ankers mit sich	Siehe I, 1 bis 11	Siehe I, 1 bis 11
III. Magnetspulenerhitzung	1. Zu langsame Umlaufzahl bei normaler Spannung 2. Zu hohe Spannung bei normaler Umlaufzahl	Unzulässig hoher Nebenschlußstrom	Einhalten der vom Fabrikanten gegebenen Leistungsangaben

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhülfe
	3. Überbrückung einer oder mehrerer Magnetspulen durch Schluß; die überbrückten Spulen bleiben kalt, die anderen werden sehr heiß; nicht selten bei Compoundmaschinen durch Berührung der dünnen und dicken Wicklung	Erhöhung des Nebenschlußstromes durch Verminderung des Widerstandes der Magnetwicklung	Beseitigung der Schlußstellen
IV. Dynamo gibt keine Spannung	1. Ohne Merkmal, Dynamo gibt aber mit Fremderregung volle Spannung	Remanenter Magnetismus verloren	Neumagnetisieren mit Fremdstrom, wobei die Stromrichtung zu beachten ist
	2. Ohne Merkmal, gibt aber mit Fremderregung volle Spannung	Maschine ist umpolarisiert durch einen Kurzschluß	Wie vorstehend
	3. Ohne Merkmal, gibt mit Fremderregung volle, aber verkehrte Spannung, + und — sind vertauscht	Anker hat andere Drehrichtung als bei der Fabrikprobe	Nebenschlußenden miteinander vertauschen
	4. Gibt mit Fremderregung keine Spannung	Magnetwicklung unterbrochen; Regulierwiderstand unterbrochen	Ausbesserung
	5. Gibt mit Fremderregung zu wenig Spannung, verbraucht dabei viel Kraft, der Anker wird schnell heiß	Kurzschluß einer oder mehrerer Ankerspulen	Ausbesserung

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhülfe
	6. Gibt mit Fremderregung ungefähr volle Spannung, dabei starke Funkenbildung ohne Erhitzung und ohne auffälligen Kraftverbrauch, die nähere Besichtigung zeigt die Erscheinung I, 1	Siehe I, 1	Siehe I, 1
	7. Gibt mit Fremderregung, ebenso aber auch bei sehr starkem Andrücken der Bürsten volle Spannung	Siehe I, 2 a. Die hervorgetretene Isolation verhindert die Berührung zwischen Kollektor und Bürste.	Siehe I, 2 a
V. Elektromotor läuft nicht an, ohne Riemen, d. h. leer	1. Ankerstrom ist vorhanden, Anker läßt sich dabei von Hand leicht drehen, funkt aber dabei stark	Kein Magnetstrom; entweder im Motor oder im Anlasser ist der Nebenschlußstromkreis unterbrochen; möglicherweise sind auch die Magnetspulen gegeneinander geschaltet, so daß falsche Pole entstehen	Abhülfe in dem einen oder anderen Sinne selbstverständlich
	2. Wie V, 1, aber ohne Unterbrechung des Magnetstromes und bei richtiger Schaltung der Magnetspulen; der Motor läuft, wenn man von Hand nachhilft, leer an und läßt sich dann belasten, mit Belastung läuft er nicht an	Falsche Verbindung des Anlassers mit dem Motor derart, daß das Magnetfeld beim Einschalten ganz schwach ist, weil der Magnetstrom nicht vor, sondern hinter dem Anlasser abgezweigt ist	Falsche Schaltung; richtig muß 1 mit 3 und ferner 2 mit 4 verbunden sein
	3. Ankerstrom und Magnetstrom vorhanden, Schaltungen genau, Anker läßt sich von Hand nur schwer und ruckweise drehen	Ankerspule oder mehrere schadhaft, verbrannt oder durchgeschlagen	Ausbesserung
	4. Kein Ankerstrom vorhanden	Anlasser oder Sicherungen unterbrochen	Ausbesserung

147. Wechselstrommaschinen und -Motoren; einphasig und mehrphasig.

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchung	Ursache	Abhhülfe
VI. Dynamo gibt keine Spannung	1. Erregerdynamo gibt keine Spannung	Siehe IV, 1; IV, 3; IV, 4; IV, 5; IV, 6; IV, 7	Siehe ebenda
	2. Erregerdynamo gibt Spannung, der Generator erhält aber keinen Magnetstrom	Magnetwicklung oder Regulator des Generators unterbrochen	Ausbesserung
	2. Erregerdynamo gibt Spannung; beim Einschalten des Magnetstromkreises des Generators entsteht ein viel zu starker Strom im Anker der Erregerdynamo	Kurzschluß zwischen den Schleifringen, beziehungsw. Kabeln, welche die Stromzuführung zur Magnetwicklung des Generators vermitteln; die Magnetspule ist überbrückt	Ausbesserung
	4. Ankerwicklung des Generators gibt nicht einmal mehr die remanente Spannung (etwa 2 bis 4% der normalen)	Unterbrechung in der Ankerwicklung	Ausbesserung
VII. Dynamo gibt nicht die volle Spannung	1. Die Maschine brummt stark, eine oder mehrere Ankerspulen erhitzen sich stark und in kurzer Zeit	Ankerspule oder mehrere verbrannt oder in sich kurz geschlossen, d. h. überbrückt; solche Spulen wirken wie kurzgeschlossene Windungen eines Transformators	Ausbesserung; in eiligen Fällen Ausschalten der schadhaften Spule, deren Windungen aber sämtl. durchschnitten werden müssen, um den Kurzschluß aufzuheben

Erscheinung der Störung	Merkmale der Untersuchnng	Ursache	Abhülfe
	2. Ohne Merkmale	Eine oder mehrere Anker- oder Magnetspulen sind falsch geschaltet, d. h. gegen die übrigen, so daß sie schwächend wirken	Abänderung
VIII Drehstrommotor, starke Erwärmung	1. Ständerwicklung stellenweise heiß, stellenweise normal warm; der Motor läuft mit geringer Zugkraft u. starkem Stromverbrauch	Kurzschluß in einer Phase oder von einer Phase mit einer zweiten; vielfach auch wie VII, 1	Ausbesserung
	2. Kurzschlußanker erhitzt sich; der Motor läuft mit verminderter Zugkraft und geringerer Umlaufzahl	Schlechte Berührung der Stäbe im Kurzschlußring; diese sollen verlötet und vernietet sein	Ausbesserung
	3. Erhitzung der Wicklung eines Schleifringläufers; der Motor brummt beim Anlaufen, zieht schlecht an	Wie VIII, 1	Wie VIII, 1
IX. Drehstrommotor läuft nicht an	1. In einer der drei Phasen kein Strom	Unterbrechung einer Phase	Ausbesserung
	2. Die Stromstärken in den drei Phasen sind verschieden	Falsche Schaltung der Phasen (60° Differenz); es ist bei einer Phase Anfang und Ende verwechselt	Vertauschen der betreffenden Drähte
	3. Ohne Merkmal	Fehler im Anlasser	Ausbesserung
	4. Ohne Merkmal	Läufer schlecht zentriert, schleift gegen das Ständereisen	Zentrieren
X. Drehstrommotor läßt sich nicht überlasten	1. Fällt leicht aus dem Tritt	Zu niedrige Spannung oder falsche Schaltung; Stern statt Dreieck	Abhülfe selbstverständlich

148. Störungen an Wechselstrommotoren. In den vorstehenden Tabellen sind der Vollständigkeit halber die Störungen an sämtlichen elektrischen Maschinen übersichtlich wiedergegeben. An dieser Stelle sollen nur Bemerkungen über Störungen an Wechselstrommotoren Aufnahme finden. Bei einem Dreiphasenmotor in Sternschaltung mit Knotenpunktsleitung müssen behufs Änderung der Drehrichtung zwei Leiter miteinander vertauscht werden, wobei jedoch die Knotenpunktsleitung nicht in Betracht kommt. Vertauscht man einen Leiter und die Knotenpunktsleitung, dann ist der Motor kein Drehstrommotor mehr. Der Motor läuft dann entweder gar nicht oder mit dem dritten Teil seiner richtigen Umdrehungszahl. In letzterem Falle verbraucht der Motor sehr viel Strom und wird rasch heiß. Die Erklärung ergibt sich aus der Polbildung der einzelnen Phasen.

Hat eine Phase im induzierten Anker des Motors Unterbrechung (hat z. B. eine Bürste schlechten Kontakt mit ihrem Schleifringe), so kommt es vor, daß der Motor mit der Hälfte seiner gewöhnlichen Umdrehungen läuft. Die Unterbrechung kann im Anker, an den Bürsten, in den Zuleitungen zum Anlaßwiderstande stattfinden. Man untersucht mit einer Glühlampe oder mit einem Spannungszeiger zuerst die Spannung zwischen je zweien der drei Schleifringe, dann die der drei Bürstenstifte u. s. w. Ist die Unterbrechung im Anker (versagt z. B. eine Lötstelle) und man hebt die Bürsten ab und schaltet das Außenfeld ein, so besitzt ein Schleifring gegen den anderen keine Spannung. Die Glühlampe wird also nicht leuchten, der Spannungszeiger keinen Ausschlag geben.

Die richtige Drehfeldschaltung kann man bei einem Zweiphasen- oder Dreiphasen-Schleifringmotor durch die Beobachtung der Läuferspannung erkennen. Legt man bei unterbrochenem Anlaßwiderstand eine Glühlampe an zwei Schleifringe des Läufers, so brennt dieselbe in allen Stellungen des Läufers gleichmäßig hell. Das Feld dreht sich in diesem Falle mit gleichförmiger Geschwindigkeit um den feststehenden Läufer herum. Bei einem Einphasenmotor dagegen, bei welchem kein Drehfeld, sondern ein hin- und herschwankendes Feld vorhanden ist, wird je nach der Stellung der betreffenden Ankerspule die Lampe heller, dunkler oder gar nicht leuchten. Ebenso verhält es sich bei jedem unregelmäßigen Drehfelde, z. B. bei einem Einphasenmotor mit Hülfsphase oder bei der oben erwähnten falschen Schaltung des Drehstrommotors. Man kann deshalb in der folgenden Weise sofort finden, ob der Drehstrommotor fehlerhaft ist. Legt man eine Glühlampe (beziehungsweise einen Spannungszeiger) an zwei Schleifringe des Läufers und dreht den Motor von Hand aus an, so muß die Spannung dieselbe

bleiben. Ändert sich jedoch die Spannung zwischen den beiden Schleifringen bedeutend, so ist der Drehstrommotor fehlerhaft. Schmilzt eine der drei Sicherungen in den Zuleitungen zum Drehstrommotor ab, so tritt dieselbe Erscheinung auf, wie beim Einphasenmotor.

V. Kapitel.

Beschreibung ausgeführter Wechselstrommaschinen und -Motoren.

149. Wechselstrommaschinen und -Motoren der Siemens & Halske A.-G. In Fig. 194 bis 196 ist der Pariser Ausstellungs-

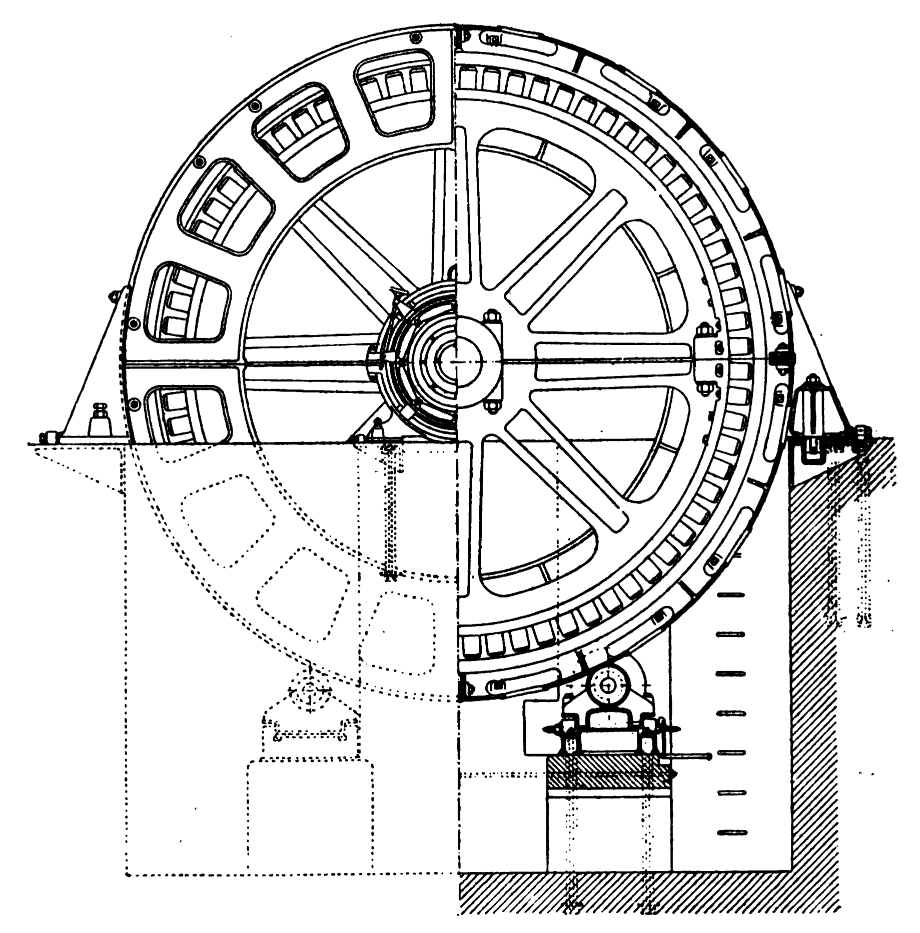


Fig. 194. Drehstromgenerator der Siemens & Halske A.-G.

generator[1]) (2000 Kilowatt Drehstrom, 50 Perioden, 2000 Volt, 83·5 Umdrehungen) der Siemens & Halske A.-G. dargestellt. Das Feldmagnetsystem besteht aus einem zweiteiligen gußeisernen Kranz, Fig. 195, der durch angegossene Speichen mit der Nabe zusammenhängt und unmittelbar auf die verlängerte Welle der Dampfmaschine aufgekeilt ist. Die 64 Pole sind aus Eisenblechen hergestellt, welche durch drei Bolzen und ein Stahlprisma von quadratischem Querschnitt fest zusammengehalten werden, Fig. 196. Das Stahlprisma enthält das Muttergewinde für die von innen durchgezogenen Schrauben, welche

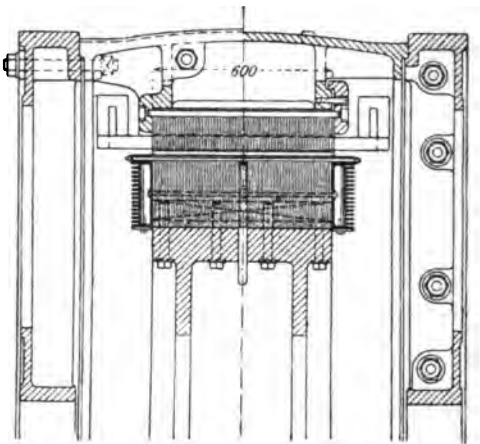


Fig. 195. Schnitt durch den Drehstromgenerator der Siemens & Halske A.-G.

die Pole mit dem gußeisernen Kranz verbinden. Zur Aufnahme der tangentialen Kräfte dient ein prismatischer Ansatz an den Polen, der in eine entsprechende Nut im Radkranz eingreift.

Die Bewicklung der Feldmagnete besteht aus hochkantig gewickeltem Flachkupfer von 4 × 23 *mm* Querschnitt. Auf jeden Pol sind 40 Windungen gelegt; das Gesamtkupfergewicht der Feldmagnetbewicklung beträgt 4000 *kg*.

Zur Durchlüftung und Kühlung der Magnete ist nachstehende Anordnung benutzt worden. An beiden Stirnseiten legt sich die Kupferwicklung um hohle Gußstücke aus Bronze. Die Luft streicht bei der Bewegung des Magneten in der Richtung des Halbmessers durch diese Hohlräume und führt die sich entwickelnde Wärme ab. Zu dem gleichen Zwecke haben auch die Feldmagnetkerne in der Mitte einen Luftspalt erhalten, welcher beständig frische Luft in den Raum zwischen Anker und Schenkeleisen leitet.

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1900, S. 345.

Für die Erregung der Feldmagnete sind höchstens 210 Volt erforderlich, denen annähernd eine gleich große Ampèrezahl entspricht, da der Gesamtwiderstand der Feldmagnetbewicklung rund 1 Ohm ist; der mittlere Leistungsverbrauch für die Erregung ist 28.000 Watt, der höchste 42.500 Watt.

Man hat es sich zur Aufgabe gestellt, dem Anker eine möglichst einfache mechanische Form zu geben, gleichzeitig aber ein Mittel zu finden, welches die genaue Zentrierung des Ankers bei dem Aufbau und, sofern dies durch eine Veränderung der Lager erforderlich werden sollte, die leichte Nachstellung gestattet.

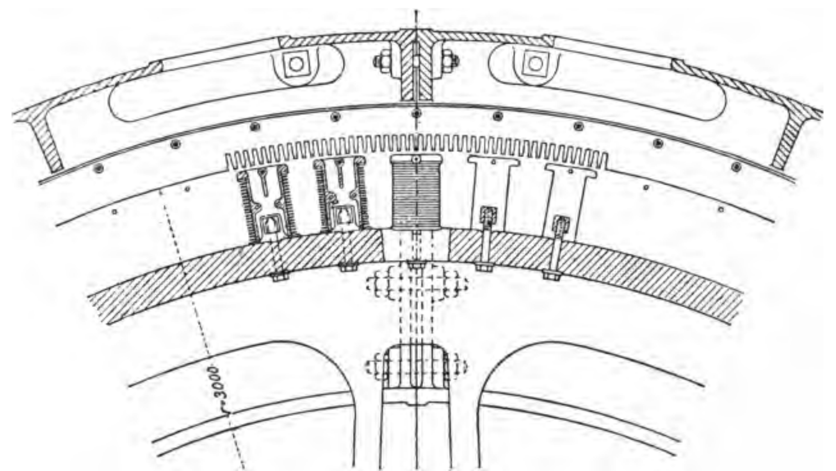


Fig. 196. Schnitt durch den Drehstromgenerator der Siemens & Halske A.-G.

Zu diesem Behufe ist man wie folgt verfahren: Man denke sich eine kurze hohle Walze, welche auf zwei passend voneinander entfernte Rollen gesetzt ist und in diesem Lager ruht. Die Rollen können einzeln oder gleichzeitig gehoben oder gesenkt werden. Es ist nun klar, daß die gleichzeitige Hebung oder Senkung dieser Lagerrollen eine entsprechende lotrechte Verschiebung der auflagernden Walze bewirken wird. Hebt oder senkt man nur eine der beiden Rollen oder hebt man die eine und senkt gleichzeitig die andere, so wird die zentrale Achse der Walze in wagrechter Richtung verschoben. Man kann also durch diese einfache Vorrichtung die zentrale Achse der Walze innerhalb gewisser Grenzen lotrecht und wagrecht verstellen und in dieser Weise die Walze zentrieren. Was hier kurz „Walze“ genannt wurde, ist nun in folgender Weise aufgebaut: Durch einen inneren und äußeren Ring, Fig. 195, welche durch starke radiale Speichen miteinander verbunden sind, wird ein flacher Kranz gebildet,

welcher außen und innen abgedreht ist. Zwei solche, genau gleiche Kränze sind parallel und konachsial nebeneinander gestellt und werden durch den zwischenliegenden Anker miteinander zu einem festen Ganzen verbunden. Jeder der beiden Tragkränze lagert in vorher geschilderter Weise, wie man aus Fig. 194 erkennen wird, auf zwei Rollen. Damit aber die große Walze, welche die miteinander verbundenen Tragkränze darstellen, nicht auf ihrem Rollenlager sich drehen kann, wird sie nach erfolgter Zentrierung an seitlich angebrachten Böcken festgeschraubt. Diese Böcke verhindern gleichzeitig auch die Bewegung des Ankers in der Richtung der Welle. Für die Betätigung der Zentriervorrichtung hat man natürlich die Verschraubung mit den Böcken zu lösen.

Der zwischen den beiden Tragkränzen liegende Ankerkern besteht aus Blechen von 0·5 *mm* Dicke, die von geeigneten Gußstücken zusammengehalten und getragen werden. Dieser Anker und ebenso die Tragkränze sind aus vier Quadranten zusammengesetzt. Die Abmessungen der Tragkränze sind derart gewählt, daß eine wesentliche Durchbiegung und ein Unrundwerden nicht stattfinden kann.

Für die Bewicklung hat der Anker 684 Nuten von 13 *mm* Breite und 55 *mm* Tiefe erhalten, in welche je ein Kupferstab von 7 × 44 *mm* Querschnitt eingelegt wird. Die Nuten sind so gestanzt, daß sich in dieselben am offenen Ende nach Einlegung des Kupferstabes ein isolierender Deckel einschieben läßt. Die Isolation der Kupferstäbe besteht aus Glimmer, welcher unmittelbar um die Stäbe gepreßt ist. Sämtliche Stäbe je eines Zweiges sind hintereinander geschaltet und die drei Zweige in Sternschaltung miteinander verbunden. Das Gesamtgewicht des Ankerkupfers beträgt 2400 *kg*, der Gesamtwiderstand der warmen Wicklung 0·057 Ohm, die Stromwärme etwa 15.000 Watt.

Die Erregermaschine, eine achtpolige Gleichstrommaschine mit Reihenschlußwicklung von 45 Kilowatt bei 210 Volt, ist eine Außenpolmaschine mit Trommelanker.

Wechsel- und Drehstromerzeuger der Siemens & Halske A.-G. Übersicht.

1. Modell *M*, für Wechselstrom *W M*, für Drehstrom *D M*, kleinere bis 500 Volt, größere bis 2000 Volt, regelrecht 50 Perioden. Rundes Gehäuse mit angebauten Lagern ohne besondere Grundplatte, Magnetstern umlaufend, Anker feststehend mit Nutenwicklung. Riemenbetrieb.

W M in 11 Größen von 2 bis 45 Kilowatt,
D M in 11 Größen von 3 bis 65 Kilowatt.

2. Modell *R* und *R R*, für Wechselstrom, *W R* und *W R R*, für Drehstrom *D R* und *D R R*, kleinere bis 5000 Volt, größere bis 10.000 Volt, regelrecht 50 Perioden. Gehäuse, Magnetrad und Anker wie bei Modell *M*, besondere Grundplatte, Riemenscheibe fliegend oder auf zwei Lagern gelagert, Erregermaschine meist unmittelbar angebaut. Kleine Maschinen für Riemen- und Seiltrieb, große für Zusammenbau mit der Betriebsmaschine. Modell *R* hat geringere, Modell *R R* höhere Umfangsgeschwindigkeit.

W R in 38 Größen von 35 bis 700 Kilowatt,
W R R in 25 Größen von 500 bis 1000 Kilowatt,
D R in 38 Größen von 50 bis 1000 Kilowatt,
D R R in 25 Größen von 75 bis 1500 Kilowatt.

Wechsel- und Drehstrommotoren der Siemens & Halske A.-G. Übersicht.

3. Modell *M*, für Wechselstrom *W M*, für Drehstrom *D M*. Kleinste Motoren bis 200 Volt, größere bis 500, 1000 und 2000 Volt, 50 Perioden, Gehäuse und Feldwicklung wie bei den Stromerzeugern *M*. Läufer mit Phasenwicklung, Schleifringe oder selbsttätige Gegenschaltung, die kleinsten Motoren mit Kurzschlußwicklung ohne Schleifringe. Riemenbetrieb.

W M in 21 Größen von 0·05 bis 20 *P*,
D M in 29 Größen von 0·1 bis 80 *P*.

4. Modell *R* und *R R*, für Drehstrom *D R* und *D R R*. Kleinere bis 3000 Volt, größere bis 500 Volt, 50 Perioden, Gehäuse, Ständer und Läufer wie Modell *M*, besondere Grundplatte. Riemen- und Seilbetrieb. Bei langsam laufenden Motoren (Pumpwerke) unmittelbarer Zusammenbau mit der Arbeitsmaschine. *R R* mit größerer Umfangsgeschwindigkeit wie *R*.

D R in 10 Größen von 60 bis 250 *P*,
D R R in 13 Größen von 90 bis 400 *P*.

150. Wechselstrommaschinen und -Motoren der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co. in Nürnberg und der **Österr. Schuckert-Werke** in Wien. Die Wechselpoltype *W J*, Fig. 197, gehört ihrer Bauart nach zur Klasse der Innenpolmaschinen und besteht im wesentlichen aus zwei Teilen, einem feststehenden, in dem der (meist hochgespannte) Wechselstrom erzeugt wird, und einem umlaufenden, der mit Gleichstrom von niedriger Spannung gespeist, das Magnetsystem bildet.

Der feststehende Teil (Anker) ist ein solides Gußeisengehäuse, das den aus dünnen Eisenblechsegmenten zusammengesetzten Ankerring umschließt. Zur Vermeidung schädlicher Wirbelströme sind die Blechsegmente durch Papierzwischenlagen voneinander isoliert.

In diesem Ankerringe (Blechpaket) befinden sich die mit Isolierhülsen ausgekleideten Löcher, durch welche die eigentliche Kupferwicklung staub- und feuchtigkeitsicher geführt ist.

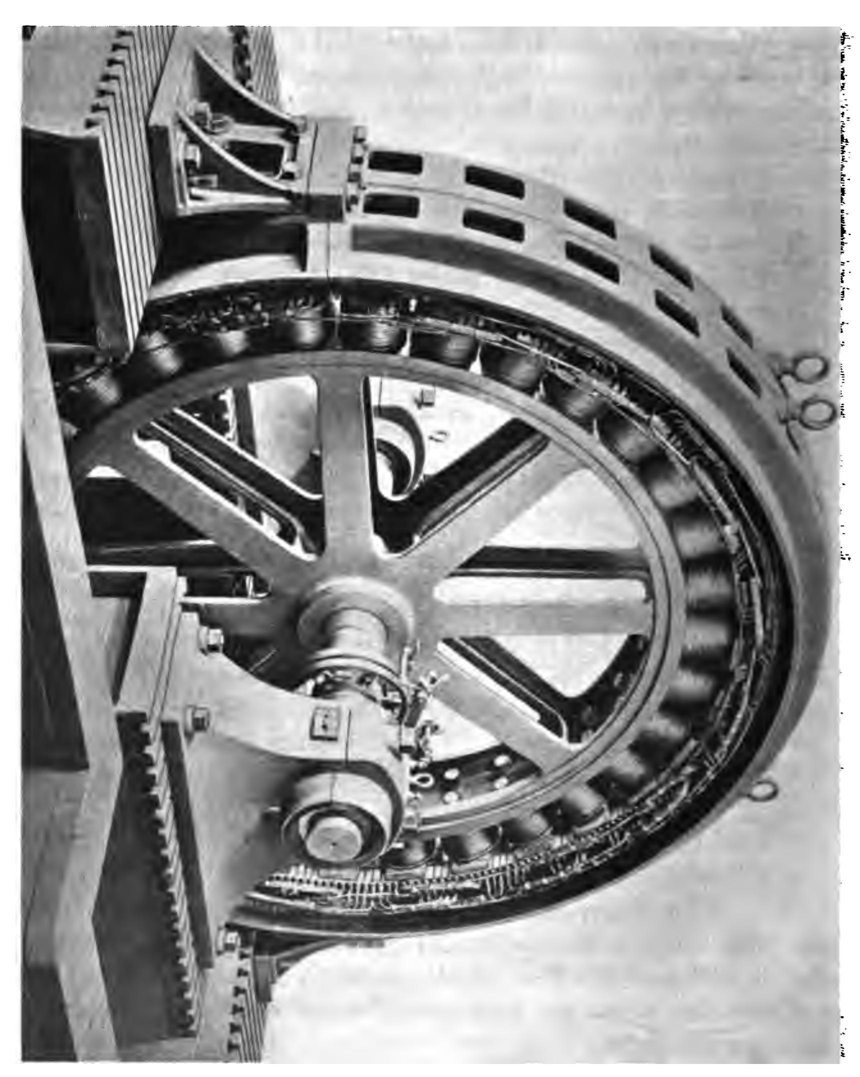


Fig. 197. Wechselpol-Drehstrommaschine der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co. und der Österr. Schuckert-Werke.

Die gewählte Bauart bietet die höchste Betriebssicherheit, denn bei derselben ist jede Beanspruchung des Hochspannungsteiles durch Zentrifugalkräfte vermieden. Da ferner eine mechanische Beanspruchung der Ankerwicklung sowie des Isolationsmaterials überhaupt nicht stattfindet und die Stromabnahme von feststehenden Klemmen ohne An-

wendung von Schleifringen und Bürsten erfolgt, so ist der Bau von Maschinen sowohl für hohe Spannung wie für hohe Stromstärke ohne Schwierigkeit möglich.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, auch während des Betriebes jederzeit eine Besichtigung und Überwachung der Bewicklung sowie des ganzen Ankers vorzunehmen.

Das Gußeisengehäuse ist als kräftiger Kastenträger derart gebaut, daß es allen einwirkenden Kräften ohne merkbare Deformation Widerstand leistet.



Fig. 198. Induktortype der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co. und der Österr. Schuckert-Werke.

Für Maschinen, welche aus Rücksicht auf schwierige Transportverhältnisse oder Zollersparnis so leicht als irgend zulässig gehalten werden sollen, findet vielfach mit Erfolg eine eigene Verspannungskonstruktion des stehenden Teiles Anwendung. Durch dieses Mittel, das in ähnlicher Form bei anderen Firmen Anklang gefunden hat, wurde durch obige Firma eine völlig starre Konstruktion bei allergeringstem Materialaufwand gewonnen.

Das Magnetrad der Maschine trägt, wie aus der Figur 197 ersichtlich, die radial nach außen stehenden Pole, deren Bewicklung je nach der Höhe der Erregerspannung aus isoliertem Draht, der in einem aus Bronze gegossenen Spulkasten eingewickelt ist, besteht oder bei

freigegebener Höhe der Erregerspannung aus einer blanken hochkantig gewickelten Kupferspirale; letztere Ausführung bietet allerhöchste Betriebssicherheit.

Das umlaufende Magnetrad ist aus Stahlguß hergestellt, wo möglichste Transporterleichterung oder Festigkeitsrücksichten es fordern, oder es besteht aus Gußeisen, wenn der Generator die zur Erzielung der Gleichförmigkeitsforderung nötige Schwungmassen aufzunehmen hat. Man erhält so die sogenannte Schwungradmaschine als organischen Teil der modernen Dampfdynamo.

Neben den Rücksichten auf mechanisch vollendete Durchbildung ist bei diesen Konstruktionen leitender Gesichtspunkt die leichte Zugänglichkeit aller Teile.

Das Maschinengehäuse ist nach seitlicher Fortnahme der Füße ohneweiters um das Wellenmittel zu drehen, so daß zur Besichtigung, gründlichen Reinigung oder zur Ausbesserung auch die Teile der Hochspannungswicklung zugänglich sind, welche sonst in der Fundamentgrube liegen.

Durch Gehäusetragarme oder sonstige Konstruktionsteile verdeckte Stücke der Wicklung gibt es nicht.

Die Zugänglichkeit aller Teile des Magnetrades ist gleichfalls gewahrt; die obere Hälfte des Maschinengehäuses ist ohne Verletzung der Wicklung jederzeit ganz leicht abzuheben, sie steht also ihrerseits der eingehendsten Untersuchung frei und dann ist auch bei geschlossenem Gehäuse jeder Magnetpol mit seiner Spule nach Lösung der Befestigungsschraube jederzeit in einigen Minuten seitlich herauszuziehen und ebenso leicht wieder einzusetzen.

Der zur Erregung erforderliche Gleichstrom wird dem Magnetrad durch zwei auf der Welle sitzende Schleifringe zugeführt; jeder Schleifring ist zur Vorsorge mit zwei Bürsten ausgerüstet. Wellen und Lagerung entsprechen bei diesen Konstruktionen auf Grund der langjährigen Erfahrung allen Anforderungen jeden Betriebes.

Nach den vorstehend geschilderten Grundsätzen sind Maschinensätze mit Leistungen bis 4500 *PS* und Gehäusedurchmessern bis 10 *m* gebaut und im Betrieb.

Bezüglich der Beschreibung der Induktortype dieser Firma Type *WN*, Fig. 198, sei auf die Beschreibung der Induktortype (I. T., 2. B., S. 298) verwiesen.

Diese Motoren für ein- oder mehrphasigen Wechselstrom sind asynchrone oder Induktionsmotoren in der allgemein gebräuchlichen Anordnung, daß der feststehende Teil den vom Netz gelieferten Strom aufnimmt, während im umlaufenden Teil die Induktionsströme entstehen.

Der äußere feststehende Teil (auch Stator, Ständer genannt) besteht aus einem kräftigen Gußeisengehäuse, welches einen aus dünnen Eisenblechen zusammengesetzten Ring umschließt. Zur Vermeidung schädlicher Wirbelströme sind die Blechsegmente durch Papierzwischenlagen voneinander isoliert. In diesem ringförmigen Blechpaket befinden sich die mit gut isolierendem Material ausgekleideten Löcher, welche staub- und feuchtigkeitssicher die eigentliche Kupferwicklung tragen.

Das zur Auskleidung der Löcher verwendete Isoliermaterial ist von solcher Beschaffenheit, daß auch bei einer durch Überlastung bedingten stärkeren Erwärmung die Isolierfestigkeit sich möglichst wenig ändert.

Die Statorwicklung kann, namentlich bei größeren Motoren, bis zu einer Spannung von 5000 Volt vollkommen betriebssicher gebaut werden, da die Stromaufnahme nur durch feststehende Klemmen ohne Anwendung von Schleifringen und Bürsten erfolgt. Unter Anwendung von Spezialkonstruktionen können im Bedarfsfalle Motoren für noch höhere Spannungen gebaut werden.

Der umlaufende Teil (auch Rotor, Läufer oder Anker genannt) ist in derselben Weise wie der Ständer aus dünnen Eisenblechen zusammengesetzt und trägt in isolierten Löchern die Wicklung. Er wird entweder mit sogenannter Kurzschlußwicklung oder mit Schleifringen ausgeführt. Im ersteren Falle sind die Ankerstromkreise in sich kurz geschlossen und nach außen ohne jede Verbindung. Die Kurzschlußanker finden hauptsächlich bei kleineren Motoren Anwendung; das Anlassen dieser Art Motoren geschieht dann meistens ohne Anlaßwiderstände lediglich durch Schließen des Hauptausschalters. Bau und Bedienung sind demnach von größter Einfachheit, die von keinem anderen Motor erreicht werden.

Beim Schleifringanker sind die Stromkreise an Schleifringe geführt, wodurch es möglich wird, in diese Stromkreise außerhalb des Ankers befindliche Widerstände einzuschalten. Diese Widerstände haben in erster Linie den Zweck, dem Motor während des Anlaufens, unter Verminderung des von außen zuzuführenden Stromes, größere Anzugskraft zu verleihen. Im Betriebe sind die Widerstände ausgeschaltet.

In zweiter Linie kann mit Hülfe von Widerständen im Ankerstromkreis eine Regulierung der Umdrehungszahl vorgenommen werden. Jedoch ist nur eine Erniedrigung, niemals eine Erhöhung der Umdrehungszahl möglich, und zwar in denselben Grenzen wie beim Gleichstrommotor durch Hauptstromwiderstände; dabei bleibt die Zugkraft unverändert und die Leistung des Motors sinkt im Verhältnis der veränderten Umdrehungszahl.

Die Leerlauf- oder synchrone Umdrehungszahl des asynchronen Motors ist abhängig von der Polwechselzahl des Netzes und seiner eigenen Polzahl und sinkt bei regelrechter Belastung um etwa 3—5% bei kleineren, um etwa 2—3% bei größeren Motoren. Der Umdrehungszahl dieser regelrechten Motoren sind 100 Polwechsel zu grunde gelegt.

In Fig. 199 ist die Gesamtanordnung einer mittleren Type des Normalmodelles, Type *N*, dargestellt. Man sieht, daß die Wicklungen leicht zugänglich sind; dabei erscheinen sie aber doch gegen mechanische Beschädigungen genügend geschützt. Die Wellen und Lager sind sorgfältigst bemessen; vor allem sind die Laufstellen der Wellen gehärtet und geschliffen. Dadurch ist die Abnützung auf das allergeringste Maß beschränkt und ein Schleifen des beweglichen Teiles am festen, zumal der Luftzwischenraum reichlich bemessen ist, auch nach einem mehrjährigen Betriebe so gut wie ausgeschlossen.



Fig. 199. Drehstrommotor der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co. und der Österr. Schuckert-Werke.

Die Lager haben sämtlich selbsttätige Ringschmierung. Die Motoren von 5 *PS* an aufwärts sind mit z w e i t e i l i g e n Lagern ausgeführt; bei den kleineren Motoren mit ungeteilten Lagerbüchsen ist auf die Möglichkeit einer leichten Auswechslung besonders Rücksicht genommen. Die Ölbehälter der Lager sind mit Ölständer versehen, die jederzeit die vorhandene Ölmenge zu überwachen gestatten.

Die Schleifringe liegen bei sämtlichen Typen innerhalb der Lager und erhalten infolgedessen durch das Lagerschild einen natürlichen Schutz. Dabei ist die Zugänglichkeit und leichte Bedienung der Schleifringe in jeder Weise gewahrt. Auch bietet diese Anordnung den Vorteil, daß eine Durchbohrung der Welle für die Schleifringzuleitungen vermieden wird.

Als Bürsten finden entweder Kupferkohlen- oder Kupfergazebürsten, die mit einer besonderen Durchtränkung versehen sind, Verwendung. Kupferkohlen- und Kupfergazebürsten unterscheiden sich in ihren äußeren Abmessungen nicht, so daß beide genau in gleicher Weise in demselben Bürstenhalter gefaßt und nach Belieben ausgewechselt werden können. Durch die Durchtränkung der Kupfergazebürsten wird erreicht, daß die Schleifringe ebensowenig wie bei Verwendung der sehr weichen Kupferkohle der Abnützung unterliegen. Die Stromzuführungsklemmen sind bei den Niederspannungsmotoren bis 500 Volt seitlich am Motorgehäuse auf einem Polbrett so angeordnet, daß die Zuleitungen unter Vermeidung von Kreuzungen in beliebiger Richtung geführt werden können. Die Klemmen sind durch einen Schutzkasten vor Berührung geschützt.

Bei den Hochspannungsmotoren sitzen die durch Porzellanhülsen völlig vor Berührung geschützten primären Klemmen oben symmetrisch zur Gehäusemitte.

Zum Anschluß der Anlaß- oder Regulierwiderstände befindet sich bei den Schleifringankermotoren auf der anderen Seite ein gleiches Polbrett wie vorher erwähnt, welches unter Vermittlung biegsamer Leitungen mit den Bürsten in Verbindung steht.

Durch diese Klemmenanordnung ist der Aufbau der Motoren ein äußerst einfacher und bequemer.

In Bezug auf Wirkungsgrad und Leistungsfaktor werden diese Motoren allen modernen Anforderungen gerecht. Die Erwärmung der Motoren im Betriebe hält sich in mäßigen Grenzen und vorübergehende stärkere Überlastungen werden ohne Schaden ertragen. Diese Motoren sind unter Verwendung des besten Materials, welches einer fortgesetzten Prüfung und Überwachung unterworfen ist, ausgeführt; auf sorgfältigste Arbeit wird peinlichst geachtet. Kein Motor verläßt die Werkstätte, der nicht in mechanischer und elektrischer Hinsicht in den Probierräumen nach den vom Verbande deutscher Elektrotechniker aufgestellten Normalien (siehe Anhang) geprüft ist.

In Fig. 200 ist das Bild eines großen Motors der Type *M* wiedergegeben. Hier sind an Stelle der Lagerschilder Bocklager und Grundplatte getreten. Für den Aufbau des Stators und Rotors, sowie

für den gesamten Schleifringapparat gilt das für das normale, mittlere Modell, Fig. 199, Gesagte.

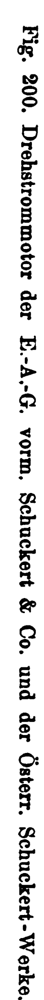


Fig. 200. Drehstrommotor der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co. und der Österr. Schuckert-Werke.

Im allgemeinen sind diese Asynchronmotoren infolge ihrer kräftigen Bauart und guten Isolation gegen mechanische Verletzungen, wie auch gegen Witterungseinflüsse sehr widerstandsfähig; wo es jedoch die besondere Art eines Betriebes verlangt, kann der ganze Motor luft- und wasserdicht eingekapselt werden.

Durch diese Kurzschluß- und Bürstenabhebevorrichtung für die Schleifringe der Asynchronmotoren, D. R. P.

Nr. 114828 und 116267, werden die Vorteile der Kurzschlußanker, mit denen der Schleifringanker verbunden. Hiebei treten nach der Anlaufperiode Anlasser und Schleifringe außer Tätigkeit; sie werden kurzgeschlossen und der Motor arbeitet im normalen Betrieb bei abgehobenen Bürsten als Motor mit Kurzschlußwicklung. Dadurch wird der Wirkungsgrad etwas erhöht und die Abnützung der Bürsten und Schleifringe vermieden.

Bei allen mit Kurzschließern und Bürstenabhebevorrichtungen ausgestatteten Asynchronmotoren — mögen diese Vorrichtungen im übrigen nach ganz verschiedenen Grundsätzen gebaut sein — sind, abgesehen vom Schließen des Hauptschalters, zum Anlassen drei Handhabungen an meist drei getrennten Hebeln notwendig:

1. Bedienen des Anlassers.

2. Kurzschließen der Schleifringe beziehungsweise der Läuferwicklung.

3. Abheben der Bürsten.

Um einer Zerstörung des Motors vorzubeugen, muß die Ausübung der einzelnen Handgriffe stets in der richtigen Reihen- und Zeitfolge vor sich gehen, wie auch beim Abstellen die umgekehrte Reihenfolge immer eingehalten werden muß.

Die hier beschriebene Vorrichtung bietet nun den Vorteil, daß eine falsche Bedienung ausgeschlossen ist, da einerseits sämtliche Handgriffe nur in der richtigen Reihenfolge gemacht werden können, anderseits nach dem Abstellen oder bei eintretenden großen Überlastungen, die ein Stehenbleiben des Motors zur Folge haben, der Kurzschluß zwischen den Schleifringen selbsttätig aufgehoben wird und der Motor sofort zum Neuanlassen bereit ist.

Über den Bau dieser Vorrichtung sei folgendes gesagt:

Die Kurzschlußkontakte für die Schleifringe beziehungsweise die Rotorwicklung sind in einer mit dem Anker rotierenden Kapsel außerhalb des Lagers untergebracht. Diese Kapsel läßt sich mit Hülfe eines Handgriffes seitlich verschieben und wird in ihren beiden Endstellungen durch ein Zentrifugalpendel festgehalten. Die eine Stellung entspricht dem Stillstand des Motors und macht die Herstellung des Kurzschlusses, solange der Motor stillsteht, unmöglich; durch das Zentrifugalpendel wird die Festhaltung erst dann gelöst, wenn der Motor nach Betätigung des Anlassers eine gewisse Umdrehungszahl überschritten hat. Jetzt kann durch leichten seitlichen Druck auf einen Handgriff die Kapsel in ihre zweite Stellung gebracht und dadurch der Kurzschluß hergestellt werden.

Es ist von der größten Wichtigkeit, daß das Kurzschließen der Läuferwicklung erst nach der Anlaufperiode möglich ist; man schützt sich dadurch gegen eine Fahrlässigkeit der Bedienungsmannschaft mit ihren schlimmen Folgen. Ein vorzeitiges Kurzschließen würde unzulässige Stromstöße und Beanspruchungen des Läufers verursachen, die leicht ein Schadhaftwerden des Motors zur Folge haben könnten.

Ist nun die Läuferwicklung kurzgeschlossen, so hält das Zentrifugalpendel die Kapsel in der Kurzschlußstellung fest; dadurch ist gleichzeitig die Verriegelung der Bürstenabhebevorrichtung gelöst und die drei Bürsten, die auf einem drehbaren Bolzen nebeneinander angeordnet sind, werden selbsttätig abgehoben.

Gleichzeitig schaltet sich der mit selbsttätiger Rückstellung versehene Anlasser aus. Letzteres ist ebenfalls von größter Wichtigkeit; denn würde beim Stillsetzen des Motors oder beim Stehenbleiben infolge Überlastung das Zurückführen des Anlassers in seine Ausschaltestellung vergessen, so würde beim Wiederanlassen dieselbe gefährliche Erscheinung wie beim vorzeitigen Kurzschließen der Läuferwicklung auftreten.

Sinkt die Umdrehungszahl unter eine gewisse Grenze, sei es, daß der Motor abgestellt wird, sei es, daß er infolge Überlastung stehen bleiben will, so wird der Kurzschluß selbsttätig aufgehoben und kann erst dann wieder hergestellt werden, wenn der Motor wieder seine regelrechte Umdrehungszahl erreicht hat. Die Vorrichtung schützt also gleichzeitig — und das ist ihr Hauptvorzug — den Motor vor gefährlichen Überlastungen.

Bekanntlich erfolgt die Regulierung der Umdrehungszahl bei Drehstrommotoren in der Regel durch Einschalten von Widerständen in den Läuferstromkreis. Dabei bleibt der Höchstwert der Zugkraft unverändert, während die höchste Leistung proportional mit der Umdrehungszahl sinkt. Ein Nachteil dieser Regulierungsmethode ist der, daß der Wirkungsgrad annähernd proportional der Umdrehungszahl abnimmt; denn es wird eine der Umdrehungszahlverminderung proportionale Leistung im Regulierwiderstand vernichtet. Auch ändert sich die Größe des Regulierbereiches bei einem gegebenen Regulierwiderstand mit der Größe der zu leistenden Zugkraft; infolgedessen kann die Umdrehungszahl eines leerlaufenden Drehstrommotors mit Widerstand im Rotor nicht reguliert werden.

Die Methode der Änderung der Polzahl bei Drehstrommotoren, D. R. P. Nr. 112094, ermöglicht es nun, zwei im Verhältnis 1 : 2 zu einander stehende Umdrehungszahlen unabhängig von der jeweiligen Belastung und ohne Leistungsverluste zu erzielen. Dabei ist

die höchste Leistung bei beiden Umdrehungszahlen gleich, die höchste Zugkraft ist demnach bei halber Umdrehungszahl doppelt so groß als die Zugkraft bei voller Umdrehungszahl.

Sind außerdem Umdrehungszahlen zwischen der vollen und halben und unter der halben verlangt, so müssen dieselben natürlich auf die übliche Weise mit Regulierwiderständen im Ankerstromkreis eingestellt werden.

Das Gehäuse, der feststehende Teil des Motors, erhält neun Stromanschlüsse, wovon sechs an einen Umschalter geführt werden. In der einen Stellung dieses Umschalters läuft der Motor mit der halben, in der anderen mit der vollen Umdrehungszahl. Da mit der Umschaltung eine Änderung der Drehrichtung verbunden ist, muß in der Hauptleitung noch ein zweiter Umschalter angeordnet werden, der, falls die Drehrichtung ungeändert bleiben soll, gleichzeitig mit dem ersten Umschalter umgelegt werden muß. Es bleibt natürlich unbenommen, diese beiden Umschalter zu einem einzigen Umschalter zu vereinigen, wenn der Motor stets nur in einer Drehrichtung laufen soll.

Der Läufer erhält fünf Schleifringe und bedarf der Umschaltung nicht, da die Änderung seiner Polzahl mit der Umschaltung des Gehäuses selbsttätig vor sich geht.

Da die fünf Schleifringe einen fünfteiligen Anlaßwiderstand erfordern, so werden im allgemeinen, der geringeren Kosten halber, Flüssigkeitsanlasser verwendet, falls nicht besondere Gründe dagegen sprechen.

Angaben über ausgeführte Generatoren und Motoren.

Dreiphasengenerator *WRd* 224/215 als Schwungradmaschine ausgebildet. Modell für unmittelbare Kuppelung mit der Dampfmaschine. Diese Type entspricht der Type *WJ*, Fig. 197, nur ist das Schwungrad entsprechend stärker gebaut.

Umdrehungen	215
Polzahl	28
Leistung	224 Kilowatt
Spannung	575 Volt
Stromstärke	3 × 225 Ampère

Gehäuse.

Blechstärke	0·5
Papier	0·05
Durchmesser innen	2300
Durchmesser außen	2600
Länge	170
Nutenzahl	168
Nut	18/40 () (Nutenform)

Magnetrad.

Durchmesser außen	2290
Polschuhbreite	160
Polschuhlänge	160
Windungen pro Pol	49
Abmessungen	1·5 × 40 mit 0·2 Papier, Blankpol.

		Erregung.
Schlitz	8	40 Volt
Zahl der Doppelspulen	42	155 Ampère
Wind. einer Doppelspule	6	

Abmessungen 1·4 Ø : 37
doppelt besponnen und beklöppelt

Dreiphasengenerator *W'Nd* 20. Vgl. Fig. 198.

Magnetrad als Klauenrad ausgebildet, Wechselpole.

Leistung	20 Kilowatt
Spannung	2000 Volt
Strom	3 × 5·8 Ampère
Touren	750
Pole	8

Außenfeld.

Bleche	0·5
Papier	0·05
Durchmesser innen	600
Durchmesser außen	800
Länge	120
Nutenzahl	24
Nut	23 : 35 () (Nutform)
Schlitz	4
Anzahl der Spulen	12
Windungen pro Spule	124½

Kupferdimension 1·2 Durchmesser
doppelt besponnen

Magnetrad.

Durchmesser außen	594
Polschuhbogenlänge	170
Polschuhbreite	120
Windungszahl der Erregerspule	1476

Kupferdimension 2·2 Durchmesser
doppelt besponnen

Erregung.

65 Volt
0·4 Kilowatt Effektbedarf.

Asynchroner Drehstrommotor *Md* 250. Vgl. Fig. 200.

Leistung	210 *PS*
Spannung	2000 Volt
Strom	56 Ampère
Touren	307
Pole	16
Polwechsel	5000 pro Minute

Außenfeld.

Bleche	0·3
Papier	0·04
Durchmesser innen	1400
Durchmesser außen	1660
Länge	354 + 3 × 12
Nutenzahl	144
Nut	23/61 ()
Schlitz	5

Kupferleiter pro Nut (11—1) à 2 parallel
Kupferdimension 4·0/4·8 Ø.

Anker.

Bleche	0·5
Papier	0·04
Durchmesser innen	1200
Durchmesser außen	1397
Länge	354 + 3 × 12
Nutenzahl	224
Nut, rechteckig	12/30
Schlitz	4
Kupferleiter pro Nut	1
Kupferdimension	7/24
Evolventen	6/28

3 Schleifringe
2 Kabel durch die Achse à 61 × 2·0 Ø zu den Schleifringen
1 Kabel durch die Achse à 61 × 2·8 Ø zu den Schleifringen
7 Bürsten 8 × 30

Asynchron-Dreiphasenmotor *Nd* 12. Vgl. Fig. 199.

Leistung	12 *PS*
Pole	6
Spannung	500 Volt
Strom	13·2 Ampère
Touren	968

mit Kurzschlußanker ausgeführt 965 Touren.

Außenfeld.	Anker.
148 Bleche à 0·5	148 Bleche à 0·5
370 Durchmesser innen	221 Durchmesser innen
537 Durchmesser außen	369 Durchmesser außen
80 Breite	80 Breite
0·04 Papier	0·04 Papier
72 Nuten 12/30 () (Nutenform)	
Schlitz 4, bei Ausführung mit Kurzschlußanker 3·5	
23 Drähte pro Nut 2·4/2·8 Ø.	

90 Nuten 7·5 × 30, bei Ausführung mit Kurzschlußanker.
89 Nuten 7 × 14.
Schlitz 3 bei Ausführung mit Kurzschlußanker 2·5.
5 Drähte in einer Nut 5/5·4 Ø, bei Ausführung mit Kurzschlußanker: 1 Stab in einer Nut 5 × 12.
3 Schleifringe, bei Ausführung mit Kurzschlußanker: 2 Kurzschlußringe 7 × 23.
6 Kohlenbürsten 12 × 35.
3 Kabel zu den Schleifringen 70 mm^2.

Wechselstrommaschinen der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. in Nürnberg und der Österreichischen Schuckert-Werke in Wien. Übersicht.

1. Modell *WJ* (aufgeschraubte Pole). Verschiedenste Größen von 12 bis 3000 Kilowatt und 75 bis 1500 Umdrehungen in der Minute bei 50 Perioden. Bis zu 20.000 Volt. Erregermaschine gewöhnlich auf derselben Achse. Modelle mit Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom, im ersten Falle mit herabgeminderter ($^3/_4$) Leistung. Die Modelle sind Innenpolmaschinen mit feststehendem Anker und umlaufendem Magnetsystem.

2. Modell *WA*. Außenpolmaschine mit feststehendem Magnetsystem und umlaufendem Anker, nach Art der mehrpoligen Gleichstrommaschinen. Von 3·6 bis 20 Kilowatt, nicht über 500 Volt und 750 bis 1500 Umdrehungen in der Minute, 50 Perioden, Riemenantrieb. *WA*-Modelle können für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom gewickelt und mit Kollektor versehen werden; sie dienen dann als Umwandler oder auch als Laboratoriumsmaschinen.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *N*. Asynchronmotor für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom bis 5000 Volt. 37 Größen von $^1/_8$ bis 700 *P* und 187 bis 2800 Umdrehungen in der Minute, 50 Perioden. Als Synchronmotoren-Modelle *W J* (siehe Wechselstrommaschinen) für Leistungen bis 3200 *P*.

4. Modell *N C* für Kran- und Aufzugsbetrieb bis 500 Volt bei 50 Perioden. 18 Modelle für Drehmomente von 3·8 bis 250 *kgm* und kleinen Umdrehungszahlen.

151. Drehstrommaschinen und -Motoren der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin. Die A. E.-G baut zwei Arten von Drehstromdynamos, welche sich durch die Anordnung der Magnete unterscheiden. Es sind dies die Maschinen Modell *D M* und *L D M*, bei denen sich die Magnete an dem feststehenden Gehäuse befinden, und die Maschinen Modell *N D M*, *K D M* und *G D M*, neuerdings Modell *K S D*, *N S D* und *G S D*, bei denen die Magnete auf drehbaren Wellen angeordnet sind.



Fig. 201. Drehstromdynamo *D M* und *L D M* der E.-A.-G.

Die Drehstromdynamos *D M*, Fig. 201, und Modell *L D M* sind in ihrer Bauweise einander gleich. Ihre Magnetgehäuse bestehen meist aus Flußeisen mit einzelnen nach innen gerichteten Polen, welche, wie bei Gleichstrommaschinen, so erregt werden, daß abwechselnd Nord- und Südpol entstehen. Auch in ihrer sonstigen Herstellungsweise und Anordnung sind diese Gehäuse ganz gleich denjenigen der Gleichstrommaschinen Modell *S G*, nur ist im allgemeinen die Polzahl bei Drehstrom erheblich größer als bei Gleichstrom, da bei weniger Polen sich zu hohe Umdrehungszahlen ergeben würden.

Auch die Wicklung der Anker ist ganz ähnlich wie bei den *S G*-Maschinen, nur werden die Spulenenden statt zu einem Kommutator zu Schleifringen geführt, und zwar zu drei Schleifringen, wenn die

Dreiecksschaltung oder die Sternschaltung ohne Ausgleichsleitung verwendet wird, und zu vier Schleifringen, wenn bei letztgenannter Schaltung noch die Ausgleichsleitung hinzukommt (Fig. 87). Da diese Schleifringe in sich vollkommen geschlossen sind, also keinerlei Stromunterbrechung in denselben eintreten kann, so ist bei ihnen eine Funkenbildung wie bei Gleichstrom ausgeschlossen. Auch wird eine Einstellung der Bürsten niemals nötig, dieselben stehen vielmehr in jeder Lage richtig.

Der Unterschied zwischen Modell *D M* und *L D M* besteht darin, daß sich die ersteren ihrer höheren Umdrehungszahl wegen für Riemen-



Fig. 202. Ankergehäuse der Drehstromdynamo *N D M* der A. E.-G.

antrieb eignen, während die *L D M*-Maschinen, mit geringerer Geschwindigkeit arbeitend, für unmittelbare Kuppelung mit der antreibenden Dampfmaschine eingerichtet sind.

Die Drehstromdynamos *D M* und *L D M* werden nur für niedere Spannungen, bis zu 200 Volt zwischen zwei Leitungen, ausnahmsweise bis 500 Volt gebaut, da bei höheren Spannungen ein Nachspannen der Bürstenhalter oder ein Auswechseln der Bürsten während des Betriebes nicht statthaft sein würde.

Die Drehstromdynamos Modell *N D M*, *K D M* und *G D M* beziehungsweise *K S D*, *N S D* und *G S D* sind in der Bauart einander vollkommen gleich und unterscheiden sich nur etwas in den äußeren Abmessungen.

Bei diesen Dynamos befinden sich die zur Stromerzeugung dienenden Windungen in dem feststehenden Ankergehäuse, Fig. 202, während die zur Bildung der magnetischen Felder erforderlichen Elektromagnete auf dem sich drehenden Magnetinduktor, Fig. 203, angeordnet sind. Die gesamte Anordnung dieser Drehstromdynamos, Fig. 204, ist derjenigen der Gleichstromdynamos insofern entgegengesetzt, als hier das Magnetfeld durch die feststehenden Windungen bewegt wird, bei Gleichstrom dagegen treten die Windungen durch das feststehende Feld. In beiden Fällen wird aber offenbar dasselbe Durchschneiden der Kraftlinien von den Windungen bewirkt.



Fig. 203. Magnetkranz der Drehstromdynamo *NDM* der A. E.-G.

Die Anordnung eines stillstehenden Ankergehäuses ist für Drehstrom besonders wichtig, da dasselbe in einfacher und betriebssicherer Weise die Anwendung auch der höchsten Spannung gestattet; es wird der erzeugte Drehstrom unter Vermeidung jedweder Schleifkontakte nur von festen Klemmen abgenommen.



Fig. 204. Drehstromdynamo *NDM* der A. E.-G.

Der Gleichstrom zur Erregung wird dem Induktor durch Bürsten und Schleifringe zugeführt, Fig. 203 bis 205.

Diese Dynamos werden entweder für Riementrieb, die größeren für Seiltrieb oder auch für unmittelbare Kuppelung gebaut. Der Antrieb erfolgt in letzterem Falle meist durch Dampfmaschinen, Fig. 205. Bei



Fig. 205. Drehstromdynamo der A. E.-G. durch Dampfmaschine betrieben. 3000 Kilowatt, 6000 Volt.

unmittelbarem Betrieb mittels Turbinen wird die Dynamo zweckmäßig unmittelbar von der Turbinenwelle betrieben. In neuerer Zeit finden auch die bei Berg- und Hüttenwerken bisher nutzlos abgehenden Hochofen- und Schwelgase zum Betriebe von Dynamos Verwendung und dürfte dieser Betriebsart nach den bisherigen Ergebnissen eine hohe Bedeutung zukommen. Der Antrieb erfolgt hiebei in gleicher Weise wie bei unmittelbarem Dampfmaschinenbetrieb.

Der Gleichstrom für die Magneterregung wird gewöhnlich durch eine besondere kleine Erregerdynamo erzeugt im Gegensatz zu Gleichstromdynamos, welche den Magnetisierungsstrom selbst liefern können. Die A. E.-G. verwendet hiezu meist Maschinen, welche entweder unmittelbar mit der Welle der Drehstrommaschine selbst verbunden sind, Fig. 206, oder von der Betriebsmaschine mittels Riemen u. s. w. angetrieben werden.

Der zur Erregung erforderliche Kraftbedarf beträgt nur wenige Prozente desjenigen der Drehstromdynamo selbst, bei größeren Maschinen weniger als 1%, bei kleineren bis zu 4%.

Um die Spannung einer Drehstromdynamo genau einzustellen und bei den verschiedensten Belastungen gleich zu erhalten, schaltet man in den Erregerstromkreis einen veränderlichen Widerstand in Gestalt eines Magnetregulators (I. T., 1. B., S. 20) ein, welcher in derselben Weise wie bei den Gleichstromdynamos der Nebenschlußregulator wirkt, so daß letztgenannte Vorrichtung gleichzeitig auch als Magnetregulator bei Drehstrommaschinen in Verwendung genommen wird.



Fig. 206. Drehstrommaschine der A. E.-G. mit gekuppelter Erregermaschine.

Es ist bei Drehstrom nicht erforderlich, daß die Belastung der drei Phasen, falls eine Beleuchtungsanlage betrieben wird, immer eine genau gleiche ist. Vielmehr sind die Drehstromdynamos der A. E.-G. derart gebaut, daß selbst bei einem Unterschiede von 100% in der Belastung nur ein Spannungsunterschied von höchstens 7% an den Maschinenklemmen eintritt. So weit als möglich, wird man jedoch stets die Belastung gleichmäßig verteilen.

Neuerdings hat die A. E.-G. in dem Aufbau ihrer großen Drehstromdynamos eine Vereinfachung eingeführt,[1]) indem sie bei den neuen Modellen den gußeisernen Mantelring des Gehäuses, der den Eisenkern mit den Windungen bisher umfaßte, Fig. 202 bis 206, wegläßt. Die erforderliche Versteifung des Eisenkernes wird dafür durch Anordnung des Gehäuses als Spannwerk erzielt, wobei einstellbare Zugstangen am Umfang dieses Gehäuses angreifen.

Der einfachste bei Drehstrommotoren verwendete Anker, der von der A. E.-G. zuerst gebaute und von ihr patentierte Kurzschlußanker (D. R. P. Nr. 51083) besteht nur aus einem Eisenkerne mit Nuten, in welchen Kupferstäbe liegen, die an den beiden Stirnseiten des Ankers durch Metallringe miteinander verbunden (kurzgeschlossen) sind. Bei den Kurzschlußankern ist die Anlaufstromstärke eine große; es finden daher Motoren mit diesen Ankern hauptsächlich für kleinere Leistungen Verwendung.

Soll die Anlaufstromstärke kleiner werden, so ist während des Anlaufens der Widerstand im Ankerstromkreis zu vergrößern. Dies kann auf zweierlei Weise geschehen. Einmal durch Anordnung von zwei Wicklungen auf dem Anker. Die eine derselben hat einen großen Widerstand und wird nur bei dem Anlassen eingeschaltet. Nach dem Anlassen, wenn der Motor annähernd seine volle Umdrehungszahl erreicht hat, wird sie mittels eines Hebeleinrückers wieder ausgeschaltet und gleichzeitig die andere in sich geschlossene eigentliche Arbeitswicklung mit geringerem Widerstande eingeschaltet, die nunmehr als Kurzschlußwicklung wirkt. Diese Anker, deren Wicklung also für zwei Widerstandsstufen eingerichtet sind, heißen Stufenanker.

Bei einer weiteren Ankerart wird den Wicklungen des Ankers ein Widerstand vorgeschaltet, der in einer besonderen Vorrichtung, dem Anlaßwiderstand, untergebracht ist. Die Verbindung zwischen Anker und Widerstand wird durch Leitungen hergestellt, die mittels dreier Schleifringe und Bürsten an den Anker angeschlossen sind; diese Anker werden daher als Schleifringanker bezeichnet.

Die kleineren A. E.-G.-Drehstrommotoren bis zu 5 *PS* werden als Modell *KD* und *LKD* mit Kurzschlußanker, mit Stufenanker und mit Schleifringanker hergestellt.

Motoren für alle größeren Leistungen von 7·5 *PS* werden nur mit Schleifringanker nach Modell *HD* gebaut. Einen dieser Motoren, wie sie von 135 *PS* an Verwendung finden, zeigt Fig. 207.

[1]) O. Lasche: Die Konstruktion der Drehstrom-Dynamomaschine und ihre systematische Fabrikation, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 1901.



Für besondere Zwecke, insbesondere für manche Kranbetriebe u. s. w., werden diese Motoren auch mit vollkommen geschlossenem Gehäuse gebaut. Unrichtigerweise wird dieses Schließen indessen oft in Fällen verlangt, in denen offene Lager sehr wohl zulässig sind. Die dicht abgeschlossenen Motoren müssen mit Rücksicht auf die Erwärmung reichlicher bemessen sein und erfordern daher höhere Anschaffungskosten als offene Motoren. Bei den A. E.-G.-Drehstrommotoren ist ein ängstliches Abschließen um so weniger erforderlich, als bei ihnen, natürlich mit Ausnahme der Lager, keine Teile besonders zugänglich zu sein brauchen und Schleifringe sowie Anker durch die übergreifenden Lagerarme gut und sicher geschützt sind.



Fig. 207. Drehstrommotor *HD* der A. E.-G.

Anlaßvorrichtungen.

Die Anlaßvorrichtungen für asynchrone Drehstrommotoren gestalten sich infolge der diesen Motoren eigentümlichen Wirkungsweise verhältnismäßig einfacher als bei Gleichstrommotoren. (Andere als asynchrone Motoren werden für Drehstrom fast gar nicht und nur für besondere Fälle verwendet.)

Die kleineren Drehstrommotoren mit Kurzschlußanker bis etwa zur Größe *KD* 50 und *LKD* 50 können oft mittels einfachen Schalthebels angelassen werden, welcher die Gehäusewindungen

einschaltet, Fig. 208. Hiebei ist indessen vorausgesetzt, daß die Primärstation genügend groß bemessen ist und daß bei städtischen Zentralen die Vorschriften ein derartiges Anlassen gestatten. Dies gilt sowohl für leer anlaufende Motoren als auch für solche, welche unter Last angehen. Die Anzugskraft der Motoren mit Kurzschlußanker ist etwa doppelt so groß als die normale Zugkraft, was für die meisten in Frage kommenden Antriebe genügt. So haben die in der Maschinenfabrik der A. E.-G. zum Betriebe der Werkzeugmaschinen dienenden Motoren, etwa 400 an der Zahl, fast sämtlich Kurzschlußanker.

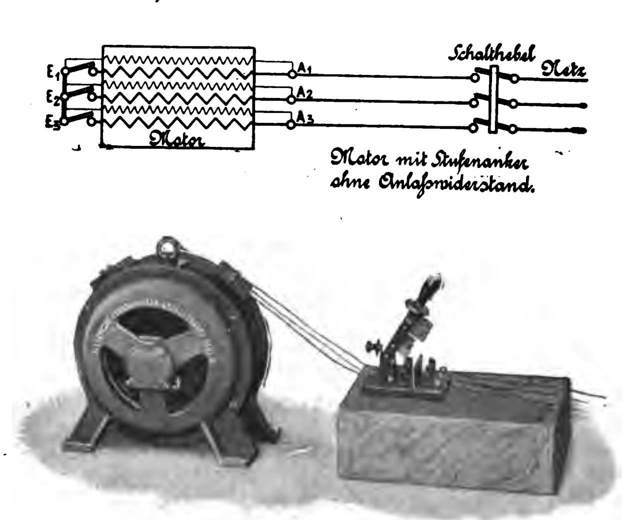


Fig. 208. Drehstrommotor der A. E.-G. mit Kurzschlußanker ohne Anlasser.

Für größere Leistungen sind in den Gehäusestromkreis Widerstände eingeschaltet, Fig. 209, die nach dem Anlassen allmählich ausgeschaltet werden, um die bei Verwendung von Schalthebeln ohne Anlaßwiderstände auftretenden Stromstöße und das damit verbundene Zucken des an dasselbe Netz angeschlossenen Lichtes zu vermeiden. Bei Kleinmotoren von über 3 *PS*, die an öffentliche Zentralen mit gemeinsamem Licht und Kraftnetz angeschlossen sind, ist diese Anordnung mit Rücksicht auf eine ungestörte Beleuchtung im allgemeinen vorgeschrieben. Es sei jedoch besonders bemerkt, daß durch das Einschalten von Widerstand in den Gehäusestromkreis die Anzugskraft nicht vergrößert wird und daß Vorschaltwiderstände im Gehäusestromkreis nur günstig auf das Netz zurückwirken, die Wirkung des Motors dagegen in keiner Weise beeinflussen. Außerdem ist dieses Hülfsmittel sehr

unvollkommen, auch soweit starker Stromverbrauch beim Anlassen vermieden werden soll. Ein wirksameres Mittel ist das Einschalten von Widerstand in den Ankerstromkreis. Hiezu ist der Schleifringanker notwendig. Der Gehäusestrom wird dann wieder mit einem Schalthebel ohne Anlaßwiderstand eingeschaltet, Fig. 210. Durch Regulieren des Widerstandes, der dem Anker zugeschaltet wird, kann aber die Anlaufperiode beliebig verlängert und so eine schädliche Rückwirkung aut das Netz vermieden werden. Oft ist das langsame Anlaufen des Motors auch mit Rücksicht auf die Arbeitsmaschine erwünscht, besonders

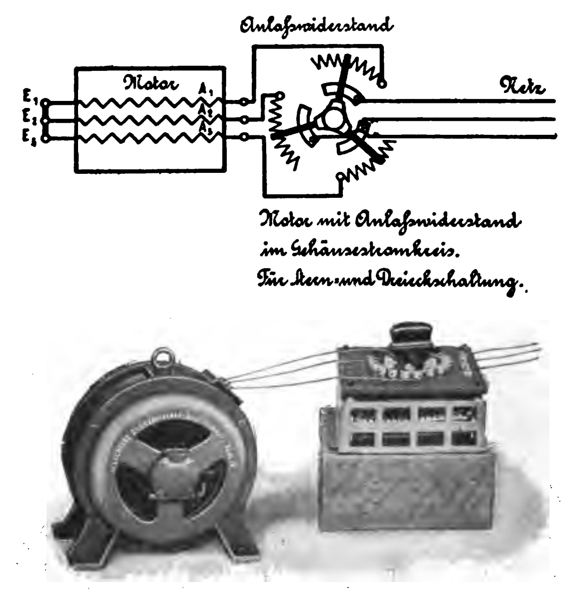


Fig. 209. Drehstrommotor der A. E.-G. mit Kurzschlußanker im Ständer.

überall da, wo große Massen zu beschleunigen sind und wo gefährliche Stöße und Schläge in den einzelnen Teilen der angetriebenen Maschine entstehen würden, wenn der Motor mit Kurzschlußanker plötzlich, also ruckweise, anliefe. Die verschiedene Wirkung des Kurzschluß- und des Schleifringankers beim Anlaufen kann, allerdings etwas übertrieben, mit dem stoßweisen Einschalten einer Klauenkupplung und dem allmählichen, regulierbaren Einschalten einer Reibungskupplung verglichen werden. Ein weiterer Vorteil des Schleifringankers gegenüber dem Kurzschlußanker ist die erhöhte Anzugskraft des Motors, er kann beim Anlaufen das Dreifache der regelrechten Zugkraft entwickeln; der Schleifringanker wird also auch überall da zu verwenden sein, wo der

Motor mit voller Last und unter gleichzeitiger Überwindung großer Reibungs- und Beschleunigungswiderstände anlaufen muß.

Durch die Widerstände im Ankerstromkreise kann die Umlaufszahl nicht nur während der Anlaufperiode, sondern auch während des regelrechten Ganges reguliert werden. Die Feinstufigkeit dieser Regulierung vom Stillstande bis zur Umlaufszahl ist hiebei unbegrenzt.

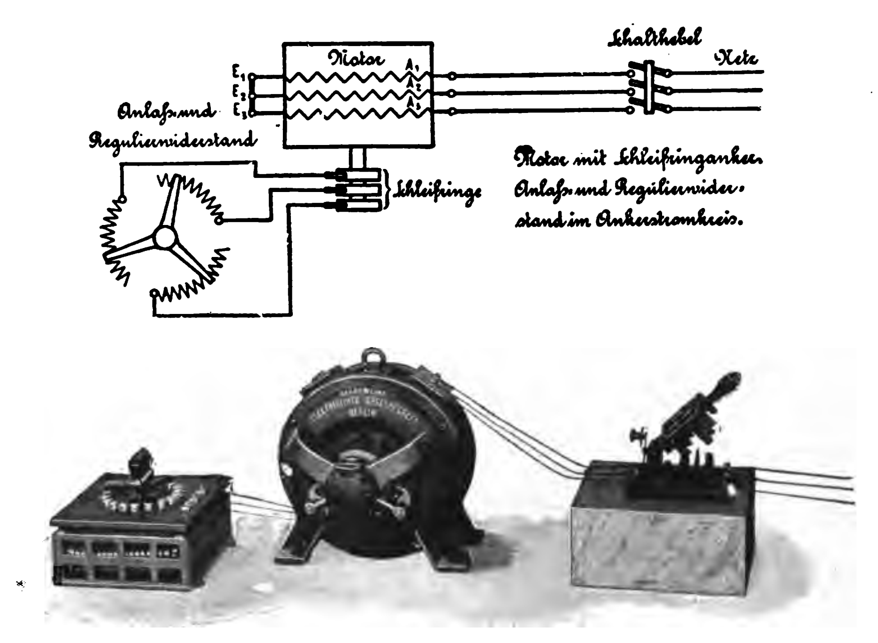
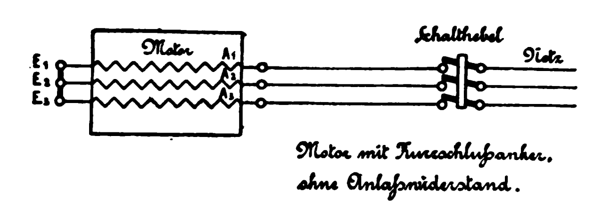


Fig. 210. Drehstrommotor der A. E.-G. mit Schleifringanker. Anlaß- und Regulierwiderstand in der Läuferwicklung.

Der Stromverbrauch beim Anlassen und beim Regulieren stellt sich bei Elektromotoren wie der Kraftbedarf einer in eine Transmission eingeschalteten Reibungskupplung. Bei dieser wird die Veränderung der Umlaufszahl durch Gleiten erzielt und der Gleitverlust erzeugt Wärme, ist also unmittelbarer Verlust. Genau das Gleiche gilt beim Elektromotor. Infolge erhöhten Widerstandes im Ankerstromkreise „schlüpft" der Anker, d. h. er gleitet gegen das rotierende Feld im Gehäuse; die vernichtete Leistung setzt sich im „Regulierwiderstand" in Wärme um, bedeutet also gleichfalls einen Verlust.

Der Schleifringanker gibt, wie wir gesehen haben, dem Drehstrommotor neue vorteilhafte Eigenschaften, allerdings unter Verzicht auf bauliche Einfachheit und unbedingte Betriebssicherheit des Kurzschlußankers. Im Anlaßschleifringanker sind nun die Vorteile

beider Ausführungsarten vereinigt. Hier werden die Schleifringe nur während der Anlaufsperiode benutzt. Ist der Motor im Gange, so wird der Ankerstromkreis durch einen einfach zu bedienenden „Kurzschließer“ kurzgeschlossen, die Bürsten werden von den Schleifringen abgehoben und so der Anker in einen Kurzschlußanker mit seinen natürlichen Vorzügen ohne schleifende Kontakte oder sonstige der Abnützung unterworfene Teile verwandelt.



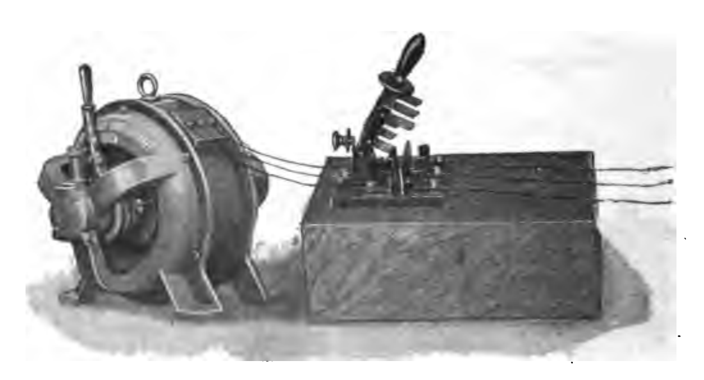


Fig. 211. Drehstrommotor der A. E.-G. mit Stufenanker ohne Anlasser.

Der **Regulierschleifringanker** unterscheidet sich von dem Anlaßschleifringanker dadurch, daß er keinen Kurzschließer hat. Er wird überall da zu verwenden sein, wo die Motoren unter den obengenannten erschwerenden Umständen häufig ein- und ausgeschaltet werden müssen und somit Kurzschließer und Bürstenabhebevorrichtung sich wegen der kurzen Betriebszeit nicht lohnen, ein Kurzschlußanker sich aus anderen Gründen verbietet, zumal auch da, wo die Umlaufszahl des Motors reguliert werden muß. Der Regulierschleifringanker findet hauptsächlich bei Kranen, Aufzügen, Druckereien und ähnlichen Betrieben Verwendung.

In Fällen, wo der Motor kein besonders hohes Anzugsmoment zu entwickeln braucht, wo es aber mit Rücksicht auf die Kraftzentrale erforderlich ist, das rasche Anlaufen der Motoren zu verlangsamen und den bei Kurzschlußankern dafür erforderlichen großen, augenblicklichen

Stromverbrauch zu verringern, kommt der Stufenanker zur Anwendung. Sein Grundgedanke ist ähnlich dem des Schleifringankers; dadurch nämlich, daß der Ankerstromkreis beim Anlassen einen großen Widerstand bietet, kann die Windungen weniger Strom durchfließen; das Anzugsmoment des Ankers ist vergrößert und die Beschleunigung vermindert. Der Unterschied gegen den Schleifringanker besteht aber darin, daß der Widerstand beim Stufenanker in diesen selbst eingebaut ist und nicht reguliert werden kann. Der Anker erhält zwei getrennte Wicklungen; eine stets in sich geschlossene von großem Widerstande und eine zweite Wicklung von geringem Widerstande, die erst durch einen Kurzschließer geschlossen wird. Beim Anlassen, Fig. 211, ist letztere geöffnet und der Motor läuft mit großem Ankerwiderstand, also langsam an; ist er auf etwa halbe Umlaufszahl gekommen, so wird auch die zweite Wicklung geschlossen, der Motor erreicht darauf seine volle Umlaufszahl und arbeitet im weiteren Verlauf wie ein Motor mit Kurzschlußanker. Da der Widerstand im Anker selbst untergebracht ist, also keine so große Abkühlfläche hat wie ein gewöhnlicher Rheostat, so darf er auch nicht beliebig lange und nicht so stark belastet werden, d. h. die Überlastungsfähigkeit des Motors beim Anlaufen ist beschränkt; außerdem ist, wie schon erwähnt, der Steigerungsgrad der Umlaufszahl im Gegensatz zum Schleifringanker, wo er beliebig reguliert werden kann, in zwei Stufen gegeben. Dafür sind aber Bau und Bedienung des Motors durch den Wegfall der Schleifringe vereinfacht, der Preis geringer und es werden außerdem die Kosten für einen besonderen Anlaßwiderstand gespart.

Wechsel- und Drehstromerzeuger der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, Berlin. Übersicht.

1. Modell *DM* und *LDM*, Außenpolmaschine für Drehstrom.

2. Modell *NDM* und *KDM*, Innenpolmaschine für Drehstrom. Dieselben Modelle für Wechselstrom, Leistung etwa 70% der gleichen Größen für Drehstrom.

DM in fünf Größen, *DM* 300, 600, 1000, 1400, 2000 für 36 bis 200 Kilowatt.

LDM in zwei Größen, *LDM* 800, 1200 für 90 und 175 Kilowatt.

Für Riemen- und Seilantrieb und für unmittelbare Kupplung.

NDM in 26 Größen, 30 bis 500 Kilowatt, für Riemen- und Seilantrieb, in 38 Größen, 175 bis 1800 Kilowatt, für unmittelbare Kupplung, Schwungradmaschinen.

KDM in vier Größen, 80 bis 150 Kilowatt, für Riemen- und Seilantrieb, in sechs Größen, 80 bis 150 Kilowatt, für unmittelbare Kupplung, Schwungradmaschinen.

Drehstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *KD* und *LKD*, zylindrisches Gehäuse, stehend oder hängend, 50 Perioden.

a) Kurzschlußläufer,

b) Stufenläufer,

c) Schleifringe und Kurzschließer.

d) Schleifringe ohne Kurzschließer.

12 Größen, *KD* 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 50 und *LKD* 15, 20, 30, 50, für $^1/_8$ bis 5 *P*. *KD* 2, 3, 5, 10, 15 und *LKD* 15 nur mit Kurzschlußläufer.

4. Modell *HD* und *LHD*, zylindrisches Gehäuse, 17 Größen für 7·5 bis 200 *P*.

HD und *LHD* 75, 100, 150, 200 } mit zwei Lagern.
HD 300, 400, 500, 750, 1000, 1250 } mit zwei Lagern.
HD 1500, 1750, 2000 mit drei Lagern.

Läufer wie unter 3 (*a* bis *d*). *HD* und *LHD* 75 und 100 mit Kurzschlußläufer.

152. Wechselstromerzeuger der Union-Elektrizitätsgesellschaft, Berlin. Übersicht. Regelrechte Periodenzahl 50.

a) Mit hohen Umdrehungszahlen.

1. Modell *AT* in zwölf Größen, von 10 bis 300 Kilowatt bis 6000 Volt, mit umlaufendem Feld und feststehendem Anker; bis 150 Kilowatt. Von 220 Kilowatt aufwärts Ausführung mit drei Lagern bei Riemen- oder Seilantrieb, mit zwei Lagern Kupplung mit wagrechter Welle. (Turbinenantrieb.) Von 50 Kilowatt aufwärts mit unmittelbar angebauter Erregermaschine.

2. Modell *AT* 28, Spezialmaschinen für Turbinenantrieb, von 130 bis 550 Kilowatt für 214 Umdrehungen, mit lotrechter oder wagrechter Welle, in letzterem Falle auch mit drei Lagern bei Riemen- oder Seilantrieb, mit und ohne Erregermaschine.

b) Mit kleineren Umdrehungszahlen.

3. Modell *AT*, von 100 bis 2000 Kilowatt, mit geringer Geschwindigkeit, zur unmittelbaren Kupplung mit der Kraftmaschine. Umlaufendes Feld, feststehender Anker, mit und ohne an das Außenlager angebaute Erregermaschine; auch mit lotrechter Welle.

Bemerkung: Die Bezeichnung *AT* gilt nur für Drehstromgeneratoren. Einphasen- und monocyklische Maschinen werden mit *AS* beziehungsweise *AM* bezeichnet und in denselben Größen ausgeführt wie die Drehstrommaschinen.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

4. Modell *A T* und *A S*, Synchronmotoren, siehe Wechselstromerzeuger bis 350 *P*.

5. Modell *J*, Drehstrominduktionsmotoren von 1 bis 200 *P* mit Kurzschlußläufer, Schleifringen oder mit im Läufer eingebautem Widerstand, je nach Bedarf und nach Art der zu verwendenden Anlaßvorrichtung.

153. Wechselstromerzeuger der Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vorm. L. Schwarzkopff, Berlin. Übersicht.

1. Modell *D W* und *E W* für Drehstrom und Wechselstrom bis 4400 Volt, Anker feststehend. Induktor klauenförmig mit einer umlaufenden Erregerspule. Hufeisenförmige Erregermaschine auf gleicher Achse. Vier Größen von 21 bis 84 Kilowatt.

2. Modell *D J* und *E J* für Drehstrom und Wechselstrom bis 5500 Volt; Induktortypus mit feststehendem Anker und einer durch beide Anker gehenden Wicklung, feststehender Erregerspule und unmittelbar gekuppelter Erregermaschine. Zehn Größen von 34 bis 690 Kilowatt.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *D M* für Drehstrom bis 5000 Volt, 50 Perioden, von *D M* 5 (4 *P*) an mit Schleifringen, bis *D M* 11, auch ohne Schleifringe. 19 Größen *D M* 1 bis *D M* 19, von 0·25 bis 165 *P*.

154. Wechsel- und Drehstromerzeuger der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft Helios, Köln-Ehrenfeld. Übersicht.

a) Für Riemen- und Seilantrieb:

1. Modell *A*, Wechselstrom-Innenpolmaschine, feststehender Anker mit oder ohne Erregermaschine auf gleicher Achse. Neun Größen *A* 1 bis *A* 8, 50 Perioden, 10 bis 200 Kilowatt.

2. Modell *D W* ähnlich wie Modell *A*, Drehstrom. 13 Größen, *D W* 30 : 1000 bis *D W* 200 : 250, 30 bis 200 Kilowatt.

b) Für Zusammenbau mit der Betriebsmaschine:

3. Modell *E S W*, Wechselstrom, feststehender Anker, zwölf Größen, 80 bis 2000 Kilowatt, bis 5000 Volt.

4. Modell *D S W*, Drehstrom, desgleichen, 38 Größen, *D S W* 50 : 200 bis *D S W* 1200 : 85, 50 bis 1200 Kilowatt.

Asynchrone Wechsel- und Drehstrommotoren. Übersicht.

5. Modell *T*, für Ein- und Zweiphasenstrom, 50 Perioden. Zwölf Größen, $^1/_4$ bis 30 *P*, *T* $^1/_2$ bis *T* 6 mit Kurzschlußläufer, *T* 8 bis *T* 30 mit Schleifringen.

6. Modell *DM*, für Drehstrom, 50 Perioden. 17 Größen, $^1/_4$ bis 100 *P*, *DM* $^1/_4$ bis *DM* 6 mit Kurzschlußläufer, *DM* 8 bis *DM* 100 mit Schleifringen.

155. Wechsel- und Drehstromerzeuger der Deutschen Elektrizitätsgesellschaft zu Aachen-Garbe, Lameyer & Co., Aachen. Übersicht.

1. Modell *VP* bis 600 Volt und Leistungen bis 30 Kilowatt Drehstrom und 20 Kilowatt Wechselstrom, 50 Perioden. Außenpolmaschine. Vier Größen.

2. Modell *W* bis 10.000 Volt, Innenpolmaschine mit gemeinsamer Erregerspule und abwechselnden Nord- und Südpolen, 6- bis 12polig, 50 Perioden, sechs Größen von 30 bis 200 Kilowatt Drehstrom und 20 bis 150 Kilowatt Wechselstrom, unmittelbar gekuppelte Erregermaschine.

Drehstrom- und Wechselstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *DM* für Ein- und Dreiphasenstrom, bis 10.000 Volt, 50 Perioden, 16 Größen von 1 bis 200 *P* Drehstrom beziehungsweise $^1/_2$ bis 150 *P* Wechselstrom, außer den kleinsten Typen, Läufer mit Schleifringen.

Obige Dreh- und Wechselstromerzeuger können auch als Synchronmotoren verwendet werden.

156. Wechsel- und Drehstromerzeuger der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft, vorm. W. Lahmeyer & Co., Frankfurt a. M. Übersicht.

A. Drehstromerzeuger.

Für Kraftübertragung auf langsam laufende Motoren (Wasserhaltungen u. dgl.), regelrecht 50 Perioden.

1. Modell *F*, Maschinen mit feststehendem Anker, umlaufendem Magnetstern, mit oder ohne aufgesetzten Erreger. Die Maschinen reichen für $\cos\varphi = 0{\cdot}7$ aus.

a) Riemenantrieb, 12 Größen, *F* I bis *F* XII von 20 bis 265 Kilowatt, regelrecht 120, 240, 550, 1000, 2000 und 3000 Volt.

b) Unmittelbar gekuppelte oder auf der Welle aufgebaute Schwungradmaschinen, regelrechte Umdrehungszahlen 94, 125 und 150, ausgeführt bis 1000 Kilowatt, bis zu 10.000 Volt.

B. Wechselstromerzeuger.

Gleiche Modelle wie für Drehstrom.

Dreh- und Wechselstrommotoren. Übersicht.

A. Drehstrommotoren.

a) Asynchrone Drehstrommotoren.

2. Modell *DM* und *DMS*, ohne und mit Schleifringen, *DM* in elf Größen, *DMS* in acht Größen, $^1/_4$ bis 20 *P*, regelrecht 110, 220 und 500 Volt. Modell *H* und *HS*, ohne und mit Schleifringen, zylindrisches Gehäuse, *H* in zwölf Größen, *HS* in zwölf Größen, 20 bis 265 *P*, bis zu 3000 Volt.

b) Synchrone Drehstrommotoren,

entsprechend den Stromerzeugern.

c) Besondere Ausführungen.

Motoren mit Veränderung der Umdrehungszahl durch Polumschaltung, unmittelbar gekuppelte, langsam laufende Motoren zum Antrieb von Pumpen.

B. Wechselstrommotoren.

Gleiche Modelle wie für Drehstrom.

157. Wechselstromerzeuger der Aktiengesellschaft Elektrizitätswerke (vorm. O. L. Kummer & Co.), Dresden-Niedersedlitz. Übersicht.

1. Modell Beta mit umlaufendem Anker. Sechs Größen *WD*, *WE* 1, *WE* 2, *WG* 1 bis *WG* 3 von 7 bis 42 Kilowatt.

2. Modell Gamma bis 5000 Volt; Innenpolmaschine, feststehender Anker, niedere Umlaufszahl; besondere Erreger auf gleicher Achse. 16 Größen *WL* 1, *WL* 2, *WN* 1, *WN* 2, *WN* 3 u. s. f. bis *WT* 2, von 60 bis 500 Kilowatt.

3. Modell Delta bis 5000 Volt; Innenpolmaschine, feststehender Anker, hohe Umlaufszahl, besondere Erreger auf eigener Achse. Zehn Größen *II* 1, *II* 2, *KK* 1, *KK* 2, *KK* 3, *LL* 1, *LL* 2, *LL* 3, *MM* 1, *MM* 2 von 60 bis 400 Kilowatt.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

4. Modell Alpha für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom, kleinere Motoren bis 500 Volt, größere auch für Hochspannung. 50 Perioden. 16 Größen, *MA* bis *MP*, von 0·2 bis 110 *P* einphasig, bis 150 *P* zwei- und dreiphasig. *MA* bis *MD* ohne, die übrigen auch mit Schleifringen.

158. Wechselstromerzeuger von C. & E. Fein, Stuttgart. Übersicht.

1. Modell *SMW* bis 500 Volt, Außenpolmaschinen, umlaufender Anker. Zwölf Größen von 0·2 bis 30 Kilowatt.

2. Modell *WE* bis 5000 Volt, Innenpolmaschinen, feststehender Anker. Zehn Größen von 50 bis 400 Kilowatt.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *EW* und *MW* für Ein- und Mehrphasenwechselstrom, bis 300 Volt und mehr, in 16 Größen von $^1/_{30}$ bis 35 *P* und höher.

159. Wechsel- und Drehstromerzeuger der Gebr. Körting, Körtingsdorf bei Hannover. Übersicht.

1. Modell *WD* und *DD* bis 10.000 Volt und 50 Perioden. Innenpolmaschine mit umlaufendem Magnetsystem und feststehendem Anker. 15 Größen von 5 bis 200 Kilowatt, schnellaufend für Riemenbetrieb und langsamlaufend für unmittelbare Kupplung.

Wechsel- und Drehstrommotoren. Übersicht.

2. Modell *WM* und *DM*, asynchrone Motoren bis 10.000 Volt und 50 Perioden, für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom und für Leistungen von 0·2 bis 150 *P*.

Die Motoren für große Leistungen werden mit Schleifringen ausgeführt, die kleineren Motoren erhalten Kurzschlußläufer.

160. Wechselstrommaschinen und Motoren der Westinghouse E.-A.-G. in Berlin. Die unmittelbar verbundenen Wechselstrommaschinen der Westinghouse E.-A.-G. kann man in folgende Typen einteilen.

1. Unmittelbar gekuppelte Maschinen mit zwei Lagern und einer Welle, die durch eine elastische Kupplung oder auf andere bekannte Weise mit ihrer Kraftmaschine verbunden werden können.

2. Unmittelbar gekuppelte Maschinen, bei welchen der rotierende Teil des Generators auf der verlängerten Welle der Dampfmaschine aufgebaut ist und so die Wirkung des Schwungrades der Dampfmaschine erhöht oder unmittelbar ersetzt. Lager und Welle gehören der Dampfmaschine an und werden nicht mit dem Generator mitgeliefert.

Die unmittelbar gekuppelten Westinghouse-Wechselstrommaschinen, zerfallen in zwei Unterabteilungen:

Maschinen mit rotierendem Anker und solche mit rotierendem Magnetfelde.

1. Unmittelbar gekuppelte Wechselstrommaschinen mit rotierendem Anker.

Der Anker dieser Maschinentype, Fig. 212, besteht aus einem gußeisernen Sterne, auf den ein lamellierter Stahlkranz aufgezogen ist. Dieser lamellierte Ring magnetisiert sich, wenn die Maschine läuft, fortwährend um.

Die Stirnfläche des Ankers ist in der Richtung der Achse mit einer großen Anzahl von Nuten oder Schlitzen versehen, welche von anderen Einschnitten, die sich rings um den Anker erstrecken, rechtwinklig durchkreuzt werden. Erstere sind zur Aufnahme der isolierten Leiter, aus denen die Wicklung zusammengesetzt ist, bestimmt; letztere haben

den Zweck, eine gute Ventilation des Kernes als auch der Wicklungen zu ermöglichen.

Die Ankerwicklung: Die Ankerwicklung besteht aus Draht, Band oder Stäben, je nach der Stromstärke. Die Drahtwicklung kommt gewöhnlich bei Hochspannungsmaschinen zur Verwendung, weil hier die Stromstärke gering ist, und besteht aus auf der Maschine gewickelten

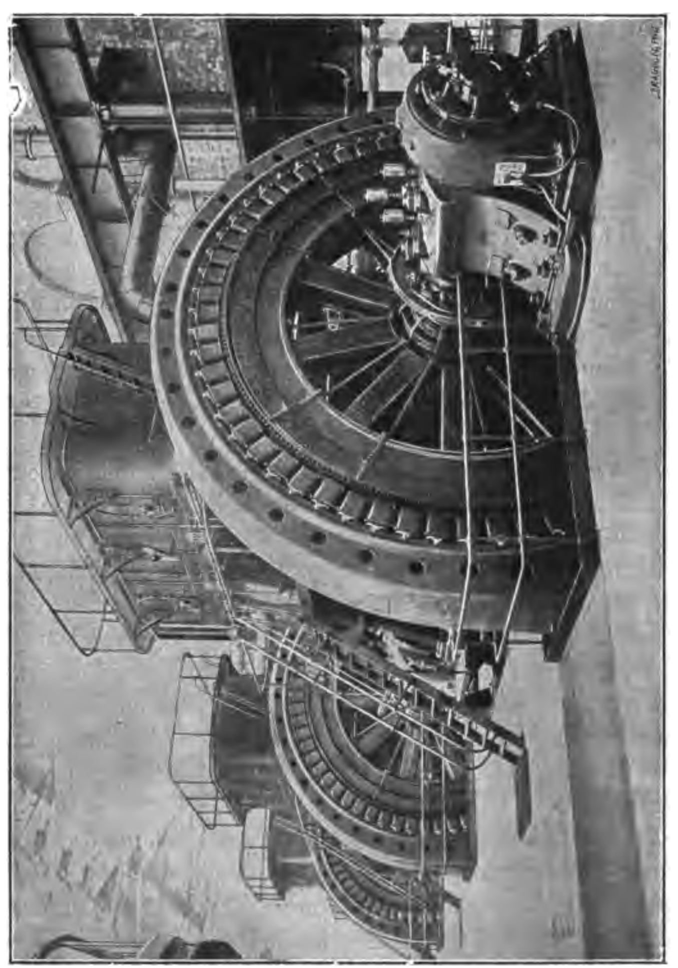


Fig. 212. 1500 *KW* Wechselstromgeneratoren mit rotierendem Anker der Westinghouse E.-A.-G.

Spulen, welche auf Schablonen hergestellt und vollständig i solier werden, bevor man sie in die Ankernuten legt. Die Bandwicklung wendet man für Niederspannungsmaschinen mit größerer Stromstärke an ; sie besteht aus Kupferband, welches in die notwendige Form gebogen und sorgfältig isoliert wird. Sowohl die Draht- als auch die Band-

wicklung legt man, ohne weitere mechanische Beanspruchung, in die Nuten ein, wodurch man einer etwaigen Beschädigung der Isolation vorbeugt. Diese Wicklungen werden in den Schlitzen durch Keile aus harter Fiber festgehalten.

Die Stabwicklungen legt man in halbgeschlossene Nuten und zwar so, daß, nachdem die Stäbe sorgfältig isoliert sind, dieselben von einer Seite des Ankers aus in die Nuten eingeführt werden. Die Endverbindungen der Stabwicklung verbindet man fest mit den Stäben, nachdem diese bereits angebracht sind.

Bei einigen Ankern werden zwei Stäbe in jede Nute verlegt, während — wie schon oben gezeigt — in anderen nur ein Stab in jede Nute kommt. Drahtbandagen verwendet man nicht. Jeder Teil der Wicklung kann, wenn nötig, leicht und schnell entfernt werden. Die Nuten sind so geformt, daß die Wicklung geschützt ist; solche Anker bezeichnet man deshalb mit dem Zusatz „gepanzerte".

Bei vielen größeren Maschinen dieser Type werden die Leiter erst dann auf dem Ankerkern angebracht, nachdem dieser auf der Welle der Dampfmaschine festgekeilt und der Aufbau so weit fortgeschritten ist, daß die Gefahr der Beschädigung der Wicklung beseitigt erscheint.

D a s M a g n e t f e l d. — Das Magnetgestell wird bei Generatoren bis 1500 Kilowatt mittels Drehbank ausgebohrt. Bei allen größeren Maschinen gießt man die Gehäuse in zwei Stücken, welche auf passenden Führungsplatten ruhen. Die Teilung geschieht in einigen Fällen in senkrechter, in anderen in wagrechter Richtung, so daß die beiden Hälften also in der Horizontal- beziehungsweise Vertikalebene voneinander getrennt werden und die Wicklung leicht zugänglich ist.

Bei horizontaler Teilung ist das untere Gußstück mit massiven Ansätzen versehen, welche unmittelbar auf den Führungsplatten aufliegen; das Magnetgehäuse kann man sodann parallel zur Welle vom Anker wegschieben.

Die Feldpole sind gleich dem Ankerkern aus einer großen Anzahl von dünnen Stahlblechen zusammengesetzt, welche in geeigneter Form gestanzt, sorgfältig ausgeglüht und dann in das Magnetjoch eingegossen sind. Ein so gebautes Magnetfeld erfordert große Sorgfalt in der Behandlung der Bleche und sehr viel Geschicklichkeit und Erfahrung beim Gießen. Die hiemit erzielten Erfolge rechtfertigen vollkommen die größeren Herstellungskosten dieser Bauart, indem nämlich dadurch das Magnetfeld sehr kräftig ausfällt, die Ankerwicklung vereinfacht wird und der Wirkungsgrad wie auch die Regulierung der Maschine bedeutend verbessert erscheinen.

Die Magnetwicklung: Die Feldspulen werden auf Schablonen mit einer Maschine gewickelt. Die Spulen der größeren Maschinen bestehen gewöhnlich aus Kupferband, das hochkantig umgebogen und dann isoliert wird. Die Spulen haben Ansätze oder Augen, mit denen sie durch Bolzen am Magnetgehäuse befestigt werden. Es liegt nur ein kleiner Teil der Spulenoberfläche diesen Ansätzen an, erstere ist daher leicht zu isolieren. Für Spulen kleinerer Maschinen wird Draht statt Kupferband verwendet.

2. Unmittelbar gekuppelte Wechselstrommaschinen mit rotierendem Magnetfelde.

Bei dieser Type von Wechselstrommaschinen steht der Anker fest, während sich das Magnetfeld dreht. Diese Bauart erleichtert erstens die Isolation der Ankerwicklung und bedingt weiter, daß anstatt des Ankerstromes der Erregerstrom durch die Bürsten und Schleifringe fließt. Die Maschinen dieser Type sind folglich besonders für hohe Spannungen oder große Stromstärken geeignet.

Das Magnetfeld wird nach Fertigstellung auf die Dampfmaschinenwelle aufgebaut. Der Bau des Feldes erinnert an ein Schwungrad mit Stahlrand. Die einzelnen Bleche werden übereinander gelegt und durch Bolzen zusammengehalten. Der Rand ist in sich selbst genügend versteift, um der Zentrifugalkraft widerstehen zu können, ohne daß dadurch der gußeiserne Stern außergewöhnlich beansprucht wird; der letztere hat nur den Zweck, den äußeren Kranz in der richtigen Lage zu halten. Es ist selbstredend dafür gesorgt, daß sich die Pole infolge von schadhaften Schraubenbolzen oder lose gewordenen Muttern nicht lockern können. In den Polstücken angebrachte Schlitze, denen die schon vorher erwähnten Aussparungen des Ankers gegenüberstehen, bewirken einen kontinuierlichen Luftzug durch den Ankerkern. Die Schleifringe für die Erregerströme sind so angeordnet, daß die Luft frei hinzu kann. Es können Kohlenbürsten angewandt werden und sowohl diese als auch die Schleifringe erfordern nur wenig Bedienung.

Die Feldwicklung: Die fertigen Magnetfelder mit aufgesteckten Spulen werden genau so gebaut, wie wir bereits bei den Maschinen mit rotierendem Anker erläutert haben. Sie werden durch Keile aus unmagnetischem Metall in ihrer Stellung festgehalten.

Der Anker: Der Anker ist feststehend und umschließt das Feld. Er besteht aus einem lamellierten Ringe, der mit Nuten auf seiner Innenfläche versehen ist, und wird durch einen äußeren gußeisernen Rahmen oder ein Joch gehalten.

Die Ankerwicklung: Die bei Besprechung der Maschinen mit rotierendem Anker gegebene Beschreibung paßt gleichfalls auf die Ankerwicklung dieser Type. Die Hochspannungswicklung ist durch ein vorstehendes Feldgehäuse geschützt. Die Endverbindungen am Anker sind sehr einfach. Die Punkte der Wicklung mit gleicher Phase werden untereinander und ferner vermittels durch das Gehäuse geführter Kabel mit den Maschinenklemmen verbunden.

Mechanische Konstruktion: Der gesamte Magnetkreis der Westinghouse-Wechselstrommaschinen mit rotierendem Magnetfelde besteht mit Ausnahme des Luftraumes aus lamelliertem Stahl und ist jede Stoßfuge und die hiedurch auftretenden unberechenbaren Widerstände vermieden worden. Die massive Bauart gewährt Sicherheit selbst bei übermäßigen Geschwindigkeiten. Die Anker dieser Maschinen können parallel zur Welle verschoben werden. Diese Ausführung wird stets bei Maschinen mit rotierendem Magnetfelde angewendet, denn wenn die Gehäuse von der Welle abgehoben würden, so müßten unbedingt mehrere Ankerspulen entfernt beziehungsweise Verbindungen gelöst werden. Dadurch aber, daß der Rahmen parallel zur Welle verschiebbar ist, vermeidet man jede Trennung der Verbindungen in einfachster Weise.

Allgemeine Bemerkungen.

Spannung und Periodenzahl: Die unmittelbar gekuppelten Wechselstrommaschinen werden für verschiedene Normalspannungen mit Einphasen- oder Mehrphasenwicklung gebaut. Die regelrechten Periodenzahlen sind 3000, 3600 und 6000 in 1 Minute.

Die Erregung: Der Erregerstrom hat stets eine niedrige Spannung und es ist üblich, die Maschine besonders zu erregen. Die kleineren Maschinen mit rotierendem Anker erhalten gewöhnlich gemischte oder Kompound-Wicklung.

Temperatur: Bei 24stündiger Vollbelastung und bei einem Leistungsfaktor von 0·9—1 beträgt die Temperaturerhöhung gegenüber der äußeren Atmosphäre nicht mehr als 40° C. Während derselben Betriebsdauer, bei demselben Leistungsfaktor und einer Überlastung von 25% beträgt dieselbe nicht mehr als 50° C. und bei einer Überlastung von 50% während einer Stunde und demselben Leistungsfaktor wird die Temperatursteigerung 60° C. nicht überschreiten.

Spannungsabfall: Geringer Spannungsabfall sowohl bei den Maschinen mit rotierendem als auch mit ruhendem Anker ist ein besonderer Vorzug dieser Wechselstrommaschinen. Ein Spannungsabfall von 8% bis 6% kann gewöhnlich bei induktionsfreier Belastung erreicht werden, was einer drei- oder vierfachen Vollbelastung bei Kurzschluß

gleichkommt. Zu den wichtigeren Faktoren, welche diesen Spannungsabfall vermindern, gehört die große Anzahl von Ankernuten für einen Pol und eine Phase. Hiedurch wird die Selbstinduktion der Wicklung vermindert und sogar eine Erhöhung der Spannung bei induktiver Belastung, sofern dies gewünscht wird, gestattet. Die Magnetschenkel sind ungesättigt und die Magnetfelder im Vergleiche zu dem Anker verhältnismäßig kräftig.

Verluste und Wirkungsgrad: Durch die Anwendung von unterteilten (lamellierten) Polen, zahlreichen Nuten sind die durch Wirbelströme in den Poloberflächen verursachten Verluste auf ein Geringstes herabgemindert.

Die Wärmeverluste in den Anker- und Feldspulen, sowie die Eisenverluste im Anker und die Reibung sind ebenfalls so gering wie praktisch erreichbar.

Der Wirkungsgrad der Maschinen mit rotierendem Anker ist etwas höher als bei denen mit rotierendem Magnetfelde.

Listenauszug der Westinghouse-Wechselstrommaschinen mit direkter Kupplung.

Annähernde Größen und andere Angaben.

Leistung	Perioden	Tourenzahl per Minute	Erforderliche Länge der Dampfmaschinenwelle	Breite des Generators rechtwinklig zur Welle
56 Kilowatt	50	250	978	1651
75 „	50	214	981	1892
75 „	50	250	981	2007
100 „	50	214	1067	2464
100 „	30	257	1067	2464
120 „	50	200	1067	2540
120 „	50	230	993	2591
125 „	50	200	1067	2540
150 „	50	200	1245	2591
150 „	50	100	1118	4115
150 „	30	225	1245	2591
150 „	50	214	1245	2591
175 „	50	167	1651	2756
175 „	50	214	1483	2553
200 „	25	214	1245	2591
200 „	25	100	1168	4038
225 „	50	150	1219	4115
250 „	30	120	1251	4038
250 „	50	167	1168	4038
250 „	50	200	1041	4115

Leistung	Perioden	Tourenzahl per Minute	Erforderliche Länge der Dampfmaschinenwelle	Breite des Generators rechtwinklig zur Welle
250 Kilowatt	50	158	1178	3505
250 „	50	97	1372	4724
250 „	29·16	250	1156	2540
300 „	30	100	1321	5486
300 „	50	125	1321	5486
300 „	50	100	1372	4724
300 „	50	108	1372	4724
350 „	50	250	2515	2845
350 „	50	167	1168	4115
400 „	50	125	1372	4724
400 „	50	120	1372	4724
410 „	50	83·5	1651	5607
475 „	30	100	1780	5486
500 „	50	120	1372	4724
500 „	25	120	1880	4775
500 „	28·67	214	1372	4724
500 „	50	125	1524	5486
500 „	50	83·5	1651	5607
750 „	50	75	1524	11125
750 „	25	$93^3/_4$	1778	6502
750 „	50	167	1854	3765
750 „	50	75	1549	7417
850 „	50	75	1778	6324
500 „	50	75	1524	7010
1000 „	26·67	100	1956	6502
1500 „	50	97	1702	10185

Die Westinghouse E.-A.-G. baut für Induktionsmotoren von 1 bis 50 *HP* die in der Figur 213 wiedergegebene Type. Der Läufer ist ein Kurzschlußanker. Der Ständer besitzt eine Mehrphasenwicklung. Einige Angaben über diese Motoren bringt die folgende Tabelle (S. 323).

Diese Motoren werden für die verschiedenen Zwecke (Krane, Ventilatoren, Antrieb von Werkstätten u. s. w.) verschieden ausgerüstet.

161. Drehstrommaschinen und -Motoren der Vereinigten Elektrizitäts-Aktiengesellschaft in Wien. Diese Firma baut Generatoren und Motoren jeder Größe. Eine große Drehstrommaschine war in Paris (1900) ausgestellt. Fig. 214 stellt einen vierpoligen Drehstrommotor für $^1/_3$ *PS* mit Kurzschlußanker dar. Im Läufer sind immer je zwei Pole kurzgeschlossen. Diese Type trägt die Bezeichnung $D\,M_a$. Fig. 115 veranschaulicht einen Drehstrommotor zu 15 *PS*,

HP	Um-drehungen	Höhe des Motors samt Riemen-spanner Zoll englisch	Gehäuse-durchmesser Zoll englisch	Nettogewicht Lbs.
1	1700	$16^{3}/_{16}$	$13^{1}/_{2}$	200
5	1120	$26^{1}/_{16}$	$20^{7}/_{8}$	640
10	1120	$28^{3}/_{8}$	23	1100
15	1120	34	28	1640
20	1120	34	28	1640
30	850	$37^{1}/_{4}$	31	1850
40	850	$37^{1}/_{4}$	31	1850
50	850	$44^{7}/_{16}$	37	2900

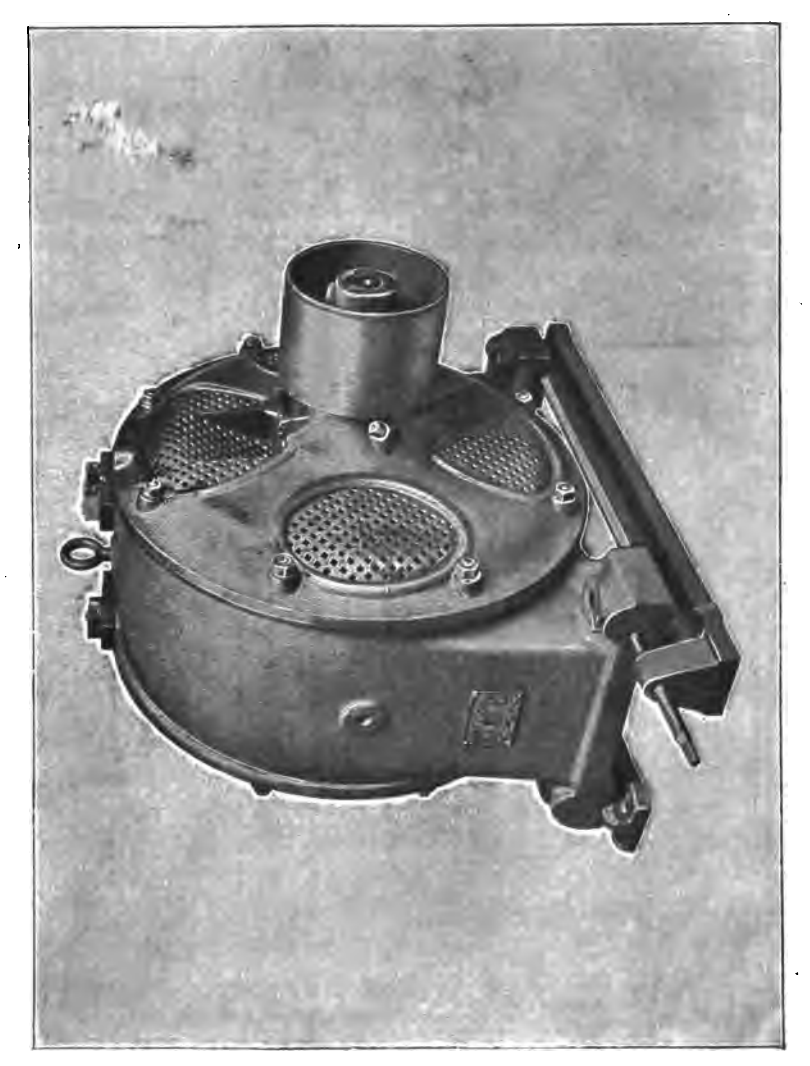


Fig. 213. Induktionsmotor Type *C* der Westinghouse E.-A.-G.

Type $D\,M_g$. Die Wellen sämtlicher Maschinen und Motoren bestehen aus Gußstahl, die Lager aus Bronze und die Schleifringe aus Messing.

Drehstrommotoren der Vereinig-

Type	Leistung in *HP*	Umdrehungen	Volt	Ampère	Wechsel	Polzahl	Ruhender Teil												
							Konstruktionsangaben *mm*							Wickelangaben					
							Blechscheiben Durchmesser	Bohrung	Eisenbreite	Nutenzahl	Nutenbreite	Nutentiefe	Schlitzbreite	Wicklungsart	Drähte per Nute	Drahtstärke blank	Drahtstärke isoliert	Beiläufige Drahtlänge	Beiläufiges Drahtgewicht *kg*
$D\,M_a$ 0·3/15	1/3	1500	110	2·5	100	4	190	125	46	24	oben 13 unten 11	12·5+0·5	2·5	Stern	56	0·95	Seide 1·2	—	15
$D\,M_b$ 1/10	1	1500	110	7·2	100	4	248	144	46	24	12	23·5+0·5	3	Stern	36	1·8	2·2	224	5
$D\,M_g$ 15/10	15	1000	120	73	100	6	580	400	110	36	22	31·5+0·5	5·5	Dreieck	(2‖) 12 (24)	2‖3·5	4·0	420	36·2
$D\,M_p$ 280/33	280	333	5000	29	100	18	1920	1598	250	108	30	49·5+0·5	7	Stern	40	3·8	4·55	3200	320

Drehstromgeneratoren der Vereinig-

Type	Leistung in *KW*	Umdrehungen	Volt	Ampère	Wechsel	Polzahl	Induzierter Teil												
							Konstruktionsangaben *mm*							Wickelangaben					
							Blechscheiben Durchmesser	Bohrung	Eisenbreite	Nutenzahl	Nutenbreite	Nutentiefe	Schlitzbreite	Wicklungsart	Drähte per Nute	Drahtstärke blank	Drahtstärke isoliert	Beiläufige Drahtlänge	Beiläufiges Drahtgewicht *kg*
$D\,D_a$ 25/10	25	1000	220	66	100	6	580	400	140	36	16·5	27·5+0·5	7	2‖ Stern	24	3	3·5	452	28·5
$D\,D_b$ 200/330	200	190	610	330	160	18	1920	1598	250	108	20	25+1	12	Stern	1	2‖ 8·5×19		83	236

Angaben über einige Maschinen und Motoren obiger Firma sind in den folgenden Tabellen wiedergegeben.

ten Elektrizitäts-A.-G. in Wien.

Drehender Teil												
Konstruktionsangaben *mm*							Wickelangaben					
Blechscheiben Durchmesser	Bohrung	Eisenbreite	Nutenzahl	Nutenbreite	Nutentiefe	Schlitzbreite	Wicklungsart	Drähte per Nute	Drahtstärke blank	Drahtstärke isoliert	Beiläufige Drahtlänge	Beiläufiges Drahtgewicht *kg*
124·3	20	46	28	6	6	2	Kurzschluß	1	0·55	0·62	—	—
143·3	60	46	35	6	13·5+0·5	2	Kurzschluß	1	4·5×10	5×10·5	—	—
399	246	110	89	7	23·5+0·5	2·5	Stern	2	2‖2·5×9	3×9·5	885	35
1595	1400	250	323	10	29·5+0·5	2·5	Stern	1	8×25	8·7×25·7	228	400

ten Elektrizitäts-A.-G. in Wien.

Induzierender Teil																
Konstruktionsangaben *mm*							Wickelangaben								Erregung	
Polschuh Durchmesser	Bohrung	Polbogen	Polschuhdicke in der Mitte	Schenkelquerschnitt	Schenkellänge	Jochquerschnitt	Wicklungsart	Lagen übereinander	Windungen nebeneinander	Windungen per Spule	Drahtstärke blank	Drahtstärke isoliert	Beiläufige Drahtlänge	Beiläufiges Drahtgewicht *kg*	Spannung in Volt	Stromstärke in Ampère
394	155	140	24·5	Stahl 75×130	72	Stahl 35×140	Serienschaltung	im Mittel 13	31	396	1·5×22	2×2·7	1490	36	63	7
1580	948	180	25	110×180	150	80×250	Serie	9	26	244	4·8	5·3	3400	540	110	36

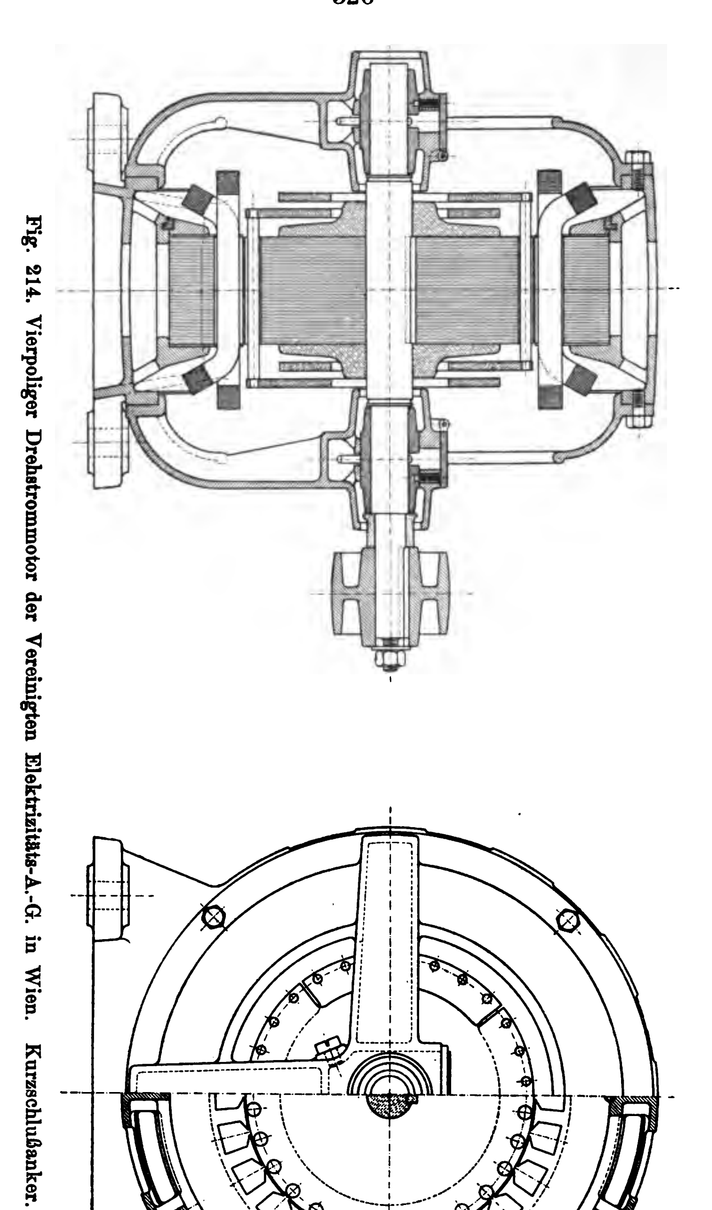


Fig. 214. Vierpoliger Drehstrommotor der Vereinigten Elektrizitäts-A.-G. in Wien. Kurzschlußanker.

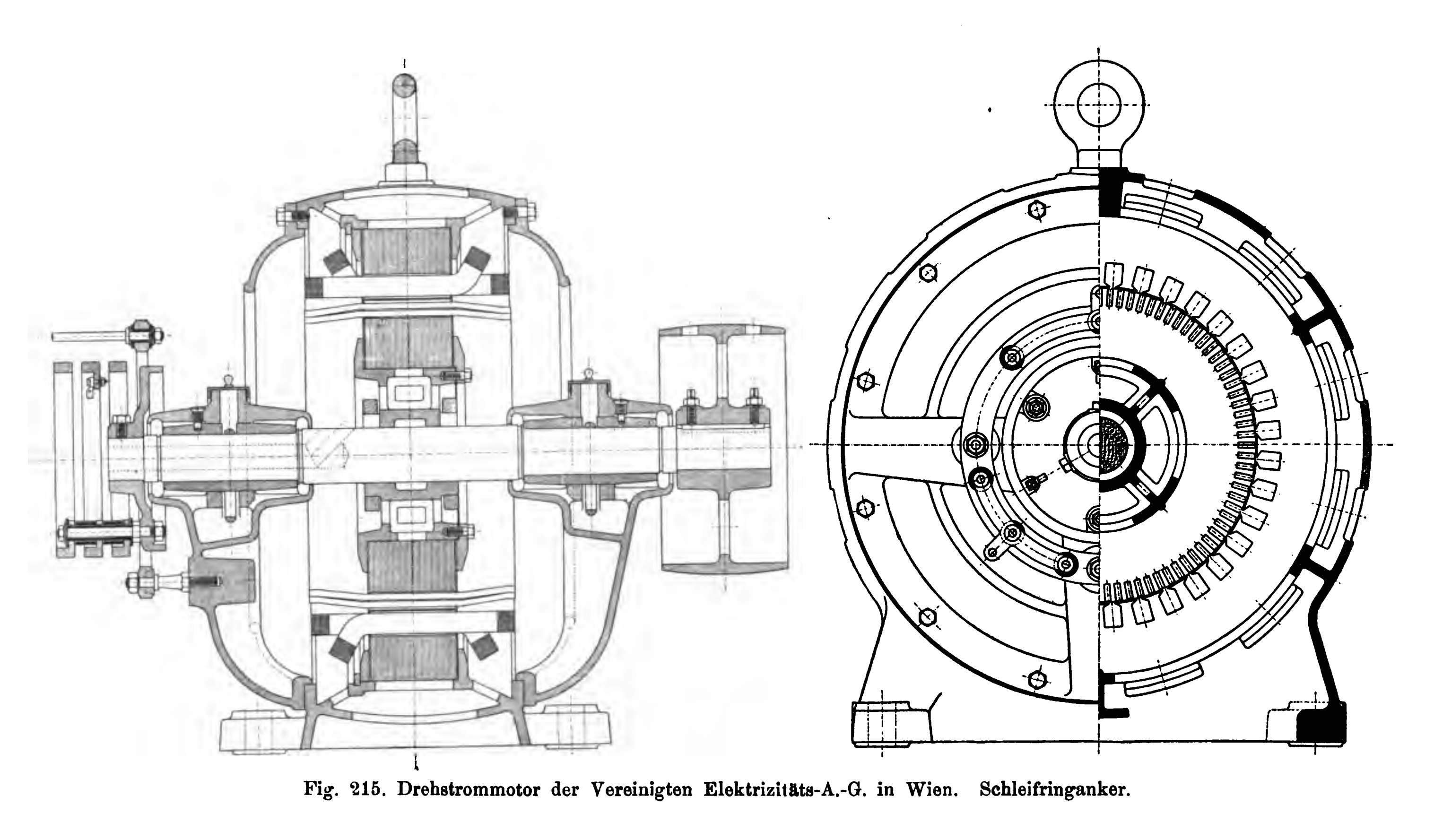


Fig. 215. Drehstrommotor der Vereinigten Elektrizitäts-A.-G. in Wien. Schleifringanker.

162. Wechsel- und Drehstromerzeuger und -Motoren von Ganz & Co., Budapest. Übersicht.

1. Modell *A*, Innenpolmaschine, als Wechselstromerzeuger neun Größen für 10 bis 400 Kilowatt.

2. Modell *A F*, Drehstromerzeuger, 29 Größen von 30 bis 1000 Kilowatt.

3. Modell *Fe*, Drehstrommotoren, rundes Gehäuse, einphasig ohne Schleifringe, Modell *F* dreiphasig, ohne Schleifringe bis 8 *P*, größere mit Schleifringen.

Fe in sechs Größen von $^1/_4$ bis 5 *P*.

F in 22 Größen von $^1/_8$ bis 240 *P*.

Die Wechselstrommaschinen dieser Firma wurden bereits an anderer Stelle (I. T., 2. B., S. 295) beschrieben.

163. Wechselstromerzeuger der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Kolben & Co., Prag-Vysočan. Übersicht.

Modell *W G* für 200, 400, 1100, 2150, 3200 und 5300 Volt, 42 und 50 Perioden.

a) Induktortype ohne umlaufende Wicklung, Erregerwicklung und Ankerwicklung feststehend, Erreger unmittelbar gekuppelt. Fünf Größen *W G* 10, 20, 40, 60, 125 von 10 bis 130 *P*. Riemen- oder Seilantrieb.

b) Innenpolmaschine, umlaufendes Stahlgußrad mit bewickelten Polen; feststehender Anker, unmittelbar gekuppelter Erreger. Riemen- oder Seilantrieb, unmittelbare Kupplung sowie als Schwungradmaschine. Sieben Größen *W G* 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 von 100 bis 700 *P*.

c) Schwungradmaschine, Innenpolmaschine wie *b*, von 200 bis 8500 Volt. Fünf Größen *W* 300, 500, 700, 1000, 2000 von 300 bis 2000 *P*. Für unmittelbare Kupplung mit Tandem- und Verbundmaschinen.

D r e h s t r o m e r z e u g e r. Übersicht.

2. Modell △ *G* von 200, 400, 1100, 2150, 3200, 5300 und 8500 Volt, 42 und 50 Perioden.

a) Induktortype, Erregerspule und Ankerwicklung feststehend, Erreger unmittelbar gekuppelt. Sechs Größen △ *G* 6, 10, 20, 40, 60, 125 von 6 bis 130 *P*.

b) Innenpolmaschine, umlaufendes Stahlgußrad mit bewickelten Polen, feststehender Anker, 12- bis 14polig, Erreger auf derselben Welle, Riemen- oder Seilantrieb, unmittelbare Kupplung und als Schwungradmaschine. Sieben Größen △ *G* 100, 150, 200, 300 *a*, 300 *b*, 300 *c*, 700 von 100 bis 700 *P*.

c) Schwungradmaschine, Innenpolmaschine wie *b*, 400 bis 2000 *P*, für unmittelbare Kupplung mit Tandem- und Verbundmaschinen.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *WM* von 100, 110 und 200 Volt, 42 und 50 Perioden.

Elf Größen *WM* $^1/_6$, $^1/_4$, 1, 3, mit Kurzschlußläufer, doch ohne die Schleifringe und mit Kurzschluß.

WM 5, 8, 12, 20, 30, 50 und 80, von $^1/_5$ bis 60 *P*, mit Schleifringen, zum Teil die Schleifringe im Gehäuse.

Drehstrommotoren. Übersicht.

Modell △ *M* $^1/_6$ bis △ *M* 12 von 200 bis 500 Volt.

△ *M* 20 bis △ *M* 80 bis 4000 Volt.

△ *M* 120 bis △ *M* 250 für 1000, 2000, 3000 und 5000 Volt.

Sämtliche Motoren für 42 und 50 Perioden.

17 Größen △ *M* $^1/_6$, $^1/_4$, 1, 2, 3 mit Kurzschlußläufer.

△ *M* 5, 8, 12, 20; 30 mit Schleifringen.

△ *M* 50, 60, 80, 120 mit Schleifringen im Gehäuse.

△ *M* 150, 200 und 250 mit zwei Lagern und Grundplatte, Schleifringe zwischen den Lagern.

Die dem △ *M* beigesetzten Zahlen geben die Größen der Maschinen in *P* an.

164. Wechsel- und Drehstromerzeuger der Maschinenfabrik Örlikon in Örlikon bei Zürich. Übersicht.

1. Induktortypus mit ruhenden Wicklungen. Normalspannungen für Wechselstrom 1000, 2100, 3200, 5200, 7500 Volt, für Drehstrom 1900, 3600, 5000, 7500 Volt; 200, 400 Volt. Zehn Größen von 7·5 bis 200 Kilowatt für Wechselstrom, 10 bis 250 Kilowatt für Drehstrom. — Als Schwungradmaschine in Größen von 500 bis 1100 Kilowatt.

2. Innenpolmaschine bis 8000 Volt in 13 Größen von 6 bis 1000 Kilowatt, als Schwungradmaschine von 300 bis 1000 Kilowatt.

Wechsel- und Drehstrommotoren. Übersicht.

3. Einphasenmotoren, von selbst angehend, mit $^1/_3$ bis $^1/_2$ der regelrechten Zugkraft, mit doppelbreiter Riemenscheibe, auf Wunsch mit Leer- und Vollscheibe; rundes Gehäuse; Motoren in neun Größen von $^1/_{20}$ bis 4 *P* mit Kurzschlußläufer, in 15 Größen 2 bis 120 *P* mit Schleifringen, Kurzschlußvorrichtung der Schleifringe und Anlaßwiderstand im Läuferstromkreis. 40, 50, 65, 85, 100 Perioden.

4. Drehstrommotoren für hohe und niedere Spannung, rundes Gehäuse; 40 und 50 Perioden.

A. Für niedere Spannung, 190 und 380 Volt.

a) Kurzschlußläufer in 11 Größen von $^1/_{20}$ bis 12 *P* ohne besondere Anlasser.

b) Drei Schleifringe und Anlaßwiderstand im Läuferstromkreis in 21 Größen von 2·5 bis 550 *P*, von 6 *P* an mit Kurzschlußvorrichtung der Schleifringe.

B. Für hohe Spannung, 1750, 3400, 5000 Volt; in 17 Größen von 20 bis 550 *P*.

Wechsel- und Drehstromerzeuger und -Motoren der Maschinenfabrik Örlikon. Die Induktortypen dieser Firma wurden bereits früher beschrieben. (I. T., 2. B., S. 298 bis 314.) Bei den Maschinen der Wechselpoltype mit höheren Umdrehungszahlen besteht das Magnetrad aus einem Blechkranz mit geraden, glatten Polzacken. Der Blechkranz sitzt auf einem eisernen Radstern. Die Polzacken tragen keine Polschuhe oder vorspringende Lappen. Die Magnetspulen können daher leicht aufgesetzt und abgenommen werden. Eiserne oder bronzene Platten halten die Spulen. Die Platten sind zwischen zwei Polzacken durch Schraubenbolzen mit dem Radkörper verschraubt. Die Spulen können auch durch eiserne Reifen mit T-förmigem Profil befestigt werden. Dann schiebt man die Reifen in Einkerbungen auf beiden Längsseiten der Polzacken. Die Wicklung der Spulen besteht bei den kleineren Typen aus rundem Kupferdraht, bei den größeren Typen aus hochkantig abgebogenem Kupferband mit Asbestzwischenlagen. Der Ankerkranz hat bei den Wechselpoltypen sowie bei den Induktortypen offene Nuten. Die Wicklung der Spulen erfolgt in Schablonen. Die Spulen werden nach besonderem Verfahren mit geschlossenen nahtlosen Mikanitröhren umgeben, in die offenen Nuten des Ankers ohne Pressung eingelegt und durch Fibrekeile gehalten. Letztere greifen seitwärts in Einkerbungen der Nut ein. Bei den Schwungradmaschinen werden die Polkerne auf dem Schwungring mit Keilen befestigt. Die Polkerne sind aus Blech zusammengenietet und mit einem schwalbenschwanzförmigen Fuß und mit Polschuhen versehen. Die Keile, welche die Polkerne festhalten, werden mit Schraubenbolzen zwischen denselben angeschraubt. Jeder Polkern kann nach Lösen der Schraubenbolzen mit seiner Spule zwischen den Keilen in der Richtung der Achse abgeschoben und die Spule heruntergenommen werden. Die Schwungradmaschinen werden auch so gebaut, daß die Pole außerhalb des feststehenden Ankers umlaufen. Dann sind die Pole mit ihren Spulen im Innern des Schwungringes angeordnet. Das Magnetsystem besteht aus einem Blechkranz mit glatten Polzacken ohne Polschuhe, welche nach innen vorstehen. Auf den Polzacken befinden sich die Spulen, welche durch Blechplatten gehalten werden. Die Blechplatten sind zwischen zwei Polzacken in seitliche Einkerbungen

eingepaßt. Der Blechkranz ist aus Segmenten zusammengesetzt, die durch Preßringe gegen das Schwungrad gepreßt werden.

Die Abmessungen der Generatoren sind so gewählt, daß der Wirkungsgrad bei Vollast bei den regelrechten Typen über 100 *PS* über 93% und bei Halblast über 89% beträgt. Der Spannungsabfall ergibt sich bei Motorenbelastung mit einem Leistungsfaktor von 0·8 etwa 25%. Die Erhöhung der Temperatur über die umgebende Luft beträgt höchstens 25° C.

Die Figuren 216 und 217 geben einen regelrechten 500 *PS*-Drehstromgenerator für 400 Umdrehungen wieder. Fig. 218 zeigt den fertigen Anker dieses Generators, Fig. 219 die fertige Maschine mit verschobenem Anker.

165. Wechselstromerzeuger von Brown, Boveri & Cie., Baden (Schweiz) und Frankfurt a. M. Übersicht.

1. Modell *W* bis 5000 Volt. Ein- und Mehrphasenmaschine mit umlaufendem Anker und feststehendem Magnetfeld, mit rundem Magnetgehäuse; Riemenantrieb oder unmittelbare Kupplung; zwei- oder dreilagerig; mit oder ohne unmittelbar gekuppelte Erregermaschine, letztere mit vierpoligem, zweispuligem stählernen Magnetsystem. Sieben Größen von 22 bis 165 *P* einphasig, 30 bis 200 *P* mehrphasig.

2. Modell *W A* von 60 bis 15.000 Volt mit feststehendem Anker und innenliegendem, umlaufendem Magnetsystem. Mit Wechselpolen, Folgepolen und Flachpolen je nach Geschwindigkeit und Spannung; Riemenantrieb oder Kupplung, zwei- oder dreilagerig, Erreger wie bei Modell *W* 500 bis 150 Umdrehungen; besondere Anordnungen für niedere Geschwindigkeiten bis 80 Umdrehungen für unmittelbare Kupplung mit den Kraftmotoren; hohe Geschwindigkeit bis 800 Umdrehungen für Kupplung mit Hochdruckturbinen. Zehn Größen von 40 bis 1000 Kilowatt einphasig, von 50 bis 1500 Kilowatt mehrphasig.

3. Modell *B* von 60 bis 1500 Volt; senkrechte Achse für Kupplung mit Turbinen, ein- oder zweilagerig, feststehender Anker mit Fundamentstern, letztere führt das Lager für die Turbinenwelle, umlaufendes Polrad aus Stahl. 28 bis 800 Umdrehungen. 15 Größen von 90 bis 1500 Kilowatt.

4. Modell *K* bis 10.000 Volt; zur Kupplung mit Dampfmaschinen; innenliegender Anker und umliegendes als Schwungrad ausgebildetes Magnetrad mit nach innen stehenden Polen. 70 bis 300 Umdrehungen. 15 Größen von 70 bis 1000 Kilowatt.

5. Modell *F* bis 15.000 Volt; zur unmittelbaren Kupplung mit Dampfmaschinen; außenliegender, feststehender, auf Tragringen ruhen-

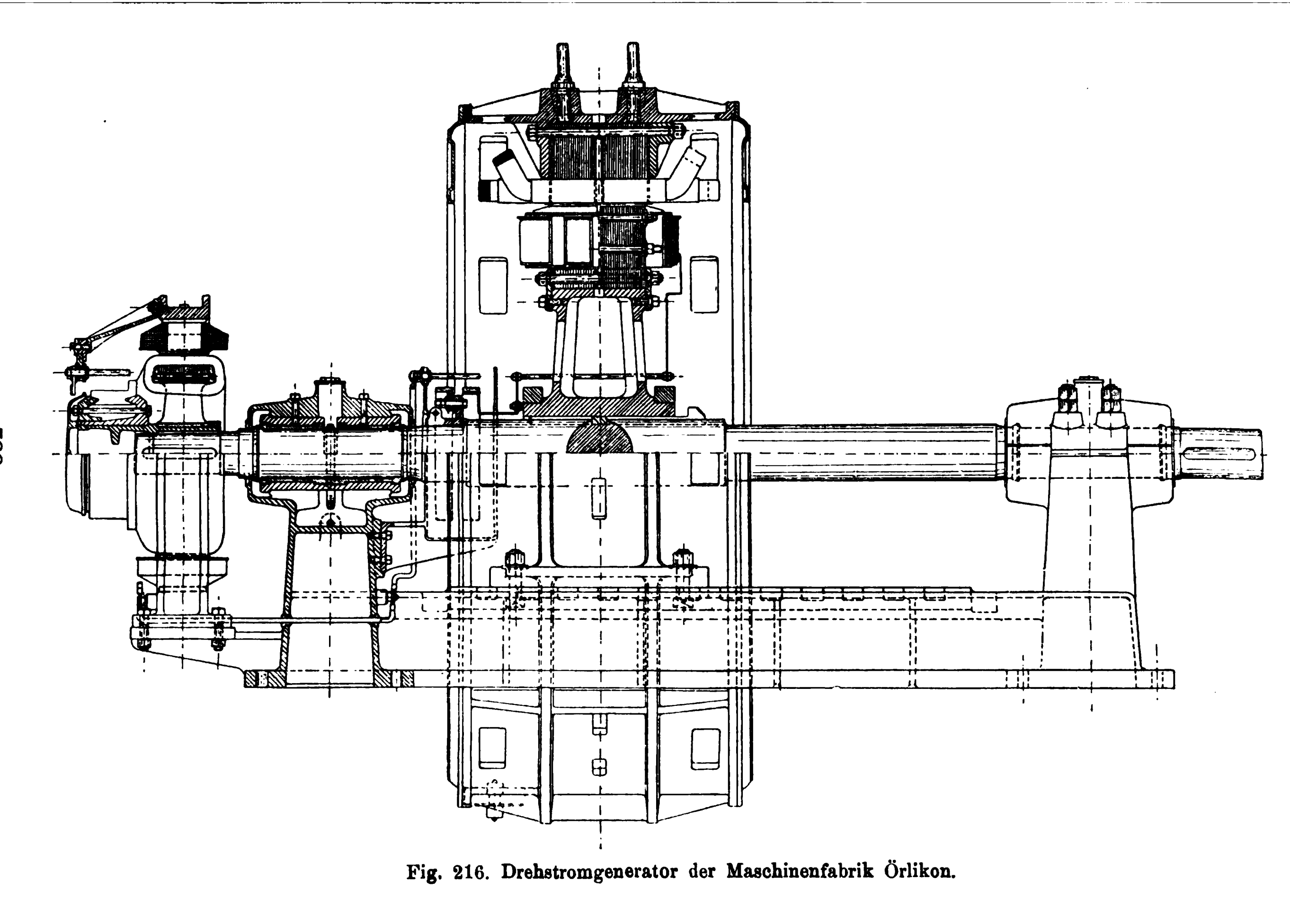


Fig. 216. Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Örlikon.

der Anker und innenliegendes, umlaufendes Magnetrad; 70 bis 300 Umdrehungen. 20 Größen bis 2000 Kilowatt.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

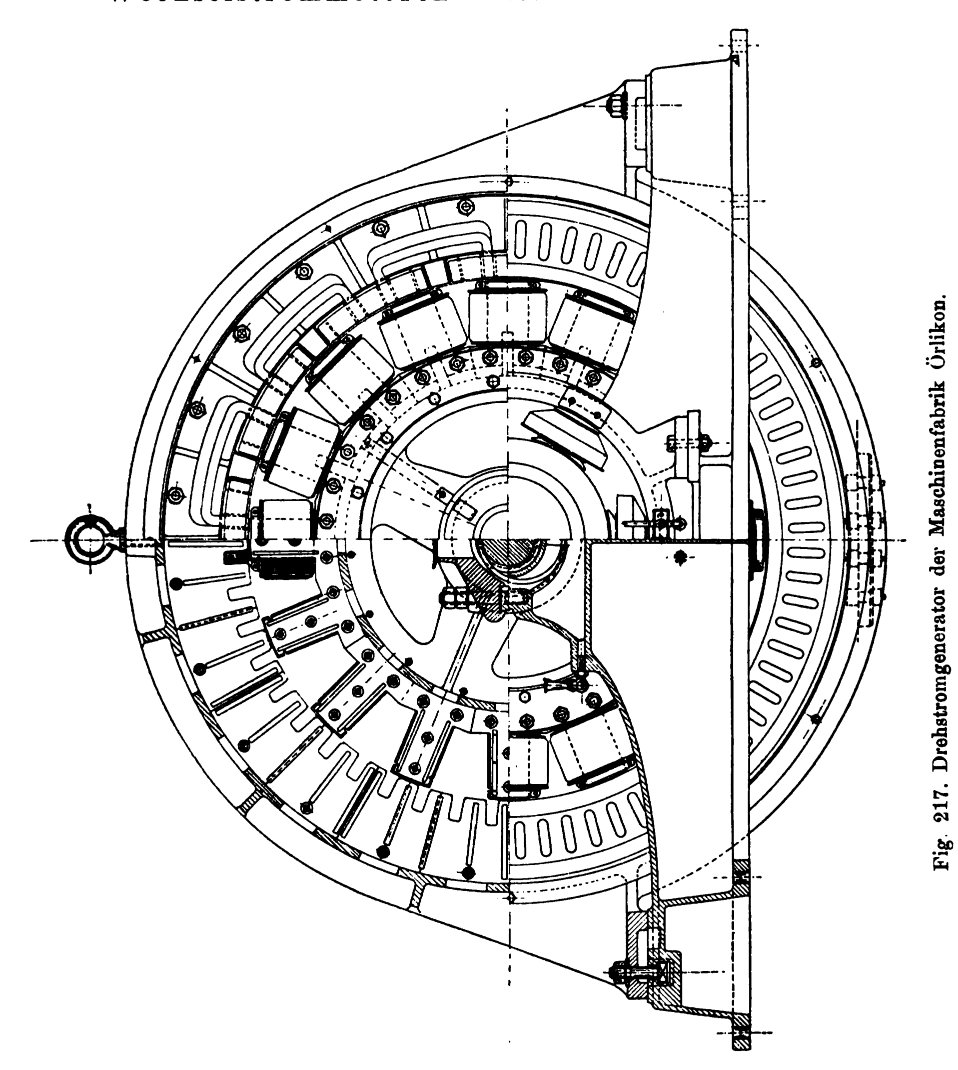


Fig. 217. Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Örlikon.

A. Einphasen-Wechselstrommotoren.

6. Modell *E K* und *E G* für Niederspannung und Hochspannung bis zu 5000 Volt; geschlossene Anordnung mit Deckeln, welche die Lager enthalten; zum Anlassen ein Kondensator für Kunstphase, sowie für die Motoren mit gewickeltem Anker ein Anlaßwiderstand für die Wicklungen des Läufers.

a) Modell *E K* mit Kurzschlußläufer, acht Größen von 0·1 bis 7 *P.*

b) Modell *E G* mit gewickeltem Läufer, 13 Größen von 3·5 bis 80 *P.*

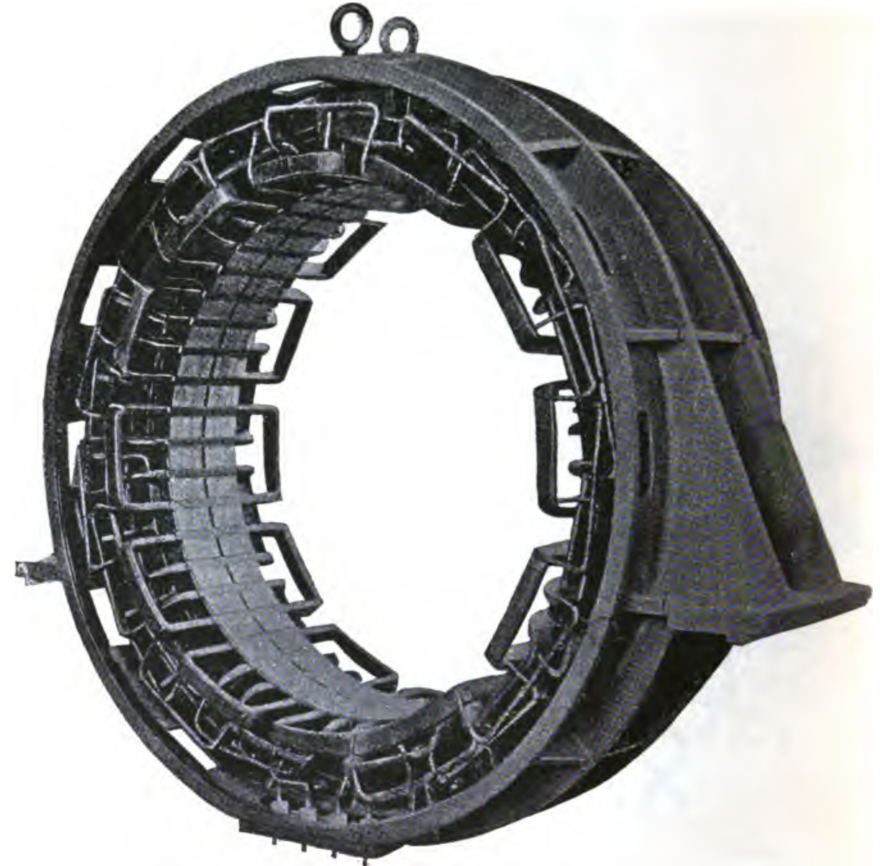


Fig. 218. Anker eines Drehstromgenerators der Maschinenfabrik Örlikon.

B. Mehrphasen-Wechselstrommotoren.

7. Modell *M K* und *M G* für Niederspannung und Hochspannung bis zu 5000 Volt; geschlossene Anordnung mit Deckeln, welche die Lager des Motors enthalten; Anlaßwiderstand für die Motoren mit gewickeltem Anker.

a) Modell *M K* mit Kurzschlußläufer, neun Größen von 0·25 bis 15 *P.*

b) Modell *M G* mit gewickeltem Läufer, 14 Größen von 5 bis 120 *P.*

8. Modell *M H O* bis 5000 Volt, offene Form, zwei- und dreilagerig, Riemenantrieb oder unmittelbar Kupplung, 400 bis 200 Umdrehungen, acht Größen von 70 bis 200 *P.*

9. Modell *M H S* bis 6000 Volt, offene Form, niedrige Geschwindigkeit für unmittelbare Kupplung, sowie hohe Geschwindigkeit zum Antrieb von Zentrifugalpumpen, zehn Größen von 160 bis 1000 *P*.

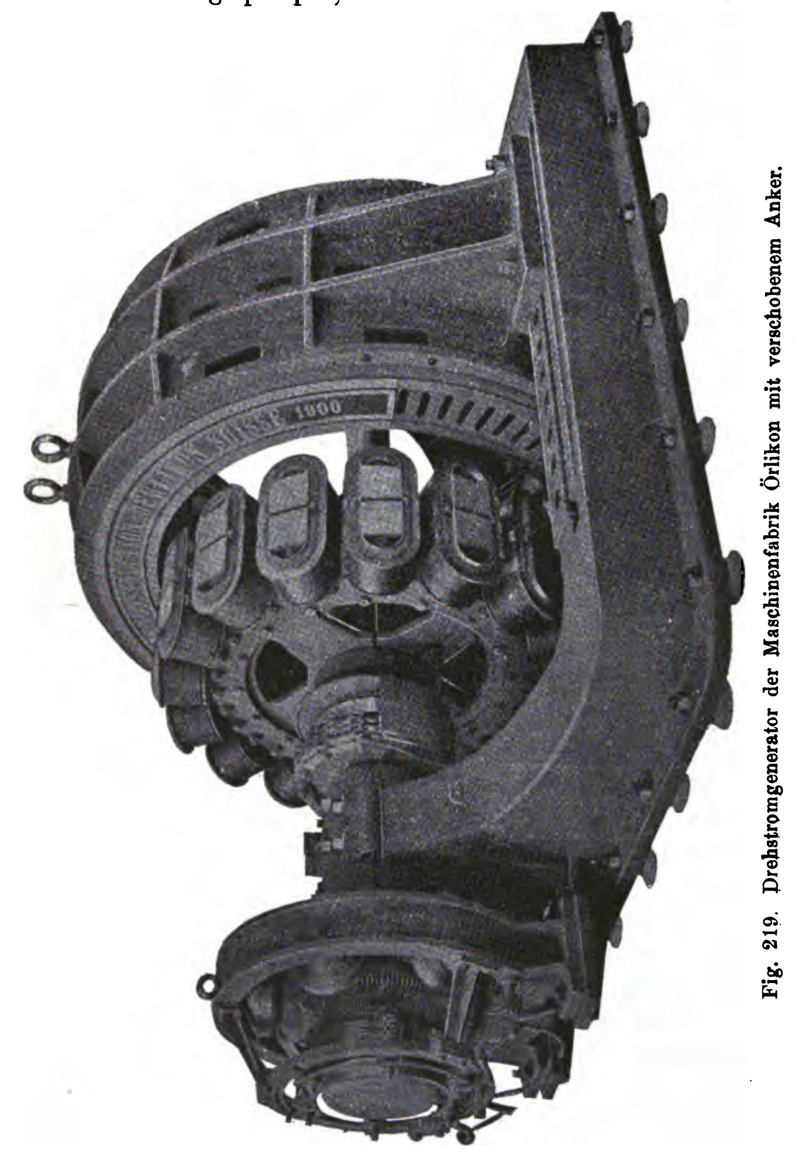


Fig. 219. Drehstromgenerator der Maschinenfabrik Örlikon mit verschobenem Anker.

166. Wechselstromerzeuger der Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth, Münchenstein-Basel. Übersicht.

1. Modell II bis XII von 2000 bis 10.000 Volt, Innenpolmaschine; feststehender Anker; besonderer Erreger auf gleicher Achse; für

Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom; elf Größen von 16 bis 550 Kilowatt.

2. Wechselstrom-Dampfdynamomaschine von 100 bis 1500 Kilowatt, 2000 bis 15.000 Volt.

Wechselstrommotoren. Übersicht.

3. Modell *W M* 00 bis *W M* 4 für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom, bis 120 Volt, 50 Perioden, sechs Größen von $^1/_{16}$ bis 1·3 beziehungsweise $^1/_{10}$ bis 2 *P*.

4. Modell *W M* 5 bis *W M* 12 für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom, bis 720 Volt, 50 Perioden, neun Größen mit einem umlaufenden Anlaßwiderstand in der Läuferwicklung.

5. Modell *W M* I bis *W M* VII für Ein-, Zwei- und Dreiphasenstrom, bis 6000 Volt, 50 Perioden, mit Schleifringen, sieben Größen von 24 bis 120 *P* beziehungsweise 40 bis 200 *P*. Spezialmodelle bis 1500 *P* und 8000 Volt.

V. Abschnitt.

Transformatoren.

1. Kapitel.

Wechselstromumsetzer.

167. Wesen und Zweck der Transformatoren (Umformer, Umsetzer, Sekundärgeneratoren).

Die Transformatoren beruhen wesentlich, gerade so wie die magnet- und die dynamoelektrische Maschine, der Funkeninduktor von Ruhmkorff und das Telephon auf der Induktion durch Magnete (I. T., I. B., S. 63 ff.).

Der einfachste Transformator besteht aus einem Eisenkerne und aus zwei verschiedenen, voneinander isolierten Wicklungen (I. T., 1. B., S. 78, Fig. 94).

Das Eisen umgibt entweder die Wicklung (Manteltransformator) oder umgekehrt, die Wicklung den Eisenkern (Kerntransformator).

Schickt man in die dünne Wicklung einen hochgespannten Strom von niedriger Stromstärke, so kann man der dicken Wicklung einen niedrig gespannten Strom von hoher Stromstärke entnehmen und umgekehrt, schickt man in die dicke Wicklung einen niedrig gespannten Strom von hoher Stromstärke, so kann man der dünnen Wicklung einen hochgespannten Strom von niedriger Stromstärke entnehmen.

Der Transformator ermöglicht deshalb und aus den folgenden Gründen die Leitung des Stromes auf sehr große Entfernungen.

Hohe Stromstärken erfordern einen großen Querschnitt der Leitungen. Setzt man demnach den Strom für die Fernleitung auf niedrige Stromstärke und hohe Spannung um, dann werden der Kupferquerschnitt der Leitung klein und der Kupferpreis niedrig sein. Hiemit ergibt sich folgende Anordnung für die wirtschaftliche Fernleitung des Stromes: In der Stromerzeugerstelle erzeugt man einen niedrig gespannten Strom von hoher Stromstärke, setzt diesen durch einen Transformator in hochgespannten Strom von niedriger Stromstärke um, schickt letzteren in die Ferne und verwandelt ihn dort für Beleuchtungszwecke in niedriggespannten Strom von hoher Stromstärke, während man denselben in Elektromotoren auch direkt verwenden kann.

Ähnliche Berechnungen wie jene, welche früher (II. T., 2 B., S. 272 ff.) durchgeführt wurden, lehren, daß wenn z. B. bei 100 Volt, 500 Ampère auf eine Entfernung von 10 *km* bei 10 Volt Spannungsverlust zu übertragen sind, das erforderliche Kupfergewicht der Leitung rund 2,880.000 *kg* beträgt. Da ein Kilogramm Rohkupfer etwa 1·14 Mk. kostet, belaufen sich die Kupferkosten der Leitung in diesem Falle auf etwa 3,283.200 Mark. Diese Kosten setzt ein Umsetzer, welcher 100 Volt in 20.000 Volt umsetzt (Umsetzungsverhältnis 1 : 200) auf den 200ten Teil, also auf 16.416 Mark herab.

Der Transformator gestattet das Produkt aus Volt × Ampère, seinem Umsetzungsverhältnisse entsprechend, in Faktoren zu zerlegen.

In dem ersten Falle war die elektrische Leistung

100 Volt × 500 Ampère = 50.000 Voltampère,

im zweiten Falle (Umsetzungsverhältnis 1 : 200)

20.000 Volt × 2·5 Ampère = 50.000 Voltampère.

Je nach den verschiedenen Umsetzungsverhältnissen erhalten wir z. B. aus einer elektrischen Leistung von 100 Volt und 500 Ampère bei der Umsetzung auf hohe Volt

mit den Umsetzungsverhältnissen 1 : 1	100 Volt × 500 Ampère	
1 : 20	2.000 „ × 25 „	
1 : 200	20.000 „ × 2·5 „	u. s. w.

Ähnlich kann man auf hohe Ampère umsetzen. In der Fernleitung setzt man auf hohe Volt, in der Stromverbrauchstelle in der Regel auf hohe Ampère um.

168. Geschichtliches. Nach § 167 sind die Transformatoren Induktionsapparate; letztere wurden von Michael Faraday (1831) erfunden (I. T., 1. B., Fig. 68 und 69).

Einen besonders wirksamen Induktionsapparat von Faraday stellt Fig. 220 dar. Dieser Apparat besteht aus einem in sich geschlossenen, massiven Eisenkerne, auf welchen zwei voneinander getrennte Drahtspulen (die primäre und sekundäre Spule) A und B isoliert aufgewickelt sind. Schickt man in die eine Drahtspule Wechselstrom oder Gleichstom mit Zuhülfenahme eines Stromunterbrechungsapparates, so werden in der zweiten Spule Induktionsströme erzeugt. Während beim Ruhmkorffschen Induktionsapparate (I. T., 1. B., S. 78) die magnetischen Kraftlinien von Pol zu Pol durch die Luft übergehen müssen, also einen sehr großen Widerstand zu überwinden haben, ist der Eisenkern dieses Apparates kreisförmig in sich geschlossen, so zwar, daß der magnetische Widerstand desselben ein kleinster wird. Die Polbildung erfolgt in diesen Apparaten sowie in bewickelten Ringen (I. T., 1. B., Fig. 60). E_1 und E_2, Fig. 220, versinnlichen die Elektroden des sekundären Stromkreises, zwischen welchen ein elektrischer Funke hervorgebracht werden kann.

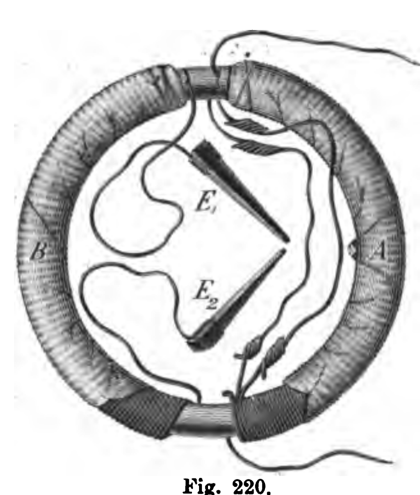


Fig. 220.
Induktionsvorrichtung von Faraday.

Eine praktisch angewendete Konstruktion eines Induktionsapparates ist der Funkeninduktor von Ruhmkorff (1851), welcher insbesondere zur Beleuchtung mit Geißlerschen Röhren und für Heilzwecke Verwendung findet. In letzterem Apparate werden Ströme von niederer Spannung in solche von hoher Spannung umgesetzt. Der primäre Strom durchfließt demnach die dicken Windungen, während der Induktionsstrom in den dünnen Windungen erzeugt wird.

Pawel Nikolajewitsch Jablochkoff (1878) benutzte zuerst den Transformator zu Beleuchtungszwecken.

Die Sekundärgeneratoren von Lucien Gaulard & Gibbs (1883) stehen nur noch im Tivoli bei Rom in Verwendung. Diese Transformatoren lehnen sich an eine frühere Konstruktion von C. T. & E. B. Bright (1852 und 1878) an. Auf einem Eisenkerne sind geschlitzte Scheiben aus isolierten dünnen Kupferblechen so aufgebaut, daß sie zwei ineinander greifende Spiralen bilden. Das Übersetzungsverhältnis dieser Apparate war 1 : 1. Der in einer Wechselstrommaschine erzeugte Strom durchfloß die primären Wicklungen der einzelnen Transfor-

matoren in Hintereinanderschaltung; von den einzelnen sekundären Wicklungen aus waren die Lampen eingeschaltet. Bei einer Spannung von 100 Volt an jeder Lampe und 20 hintereinander geschalteten Umsetzern stellte sich die erforderliche Betriebsspannung der Wechselstrommaschine auf $100 \times 20 = 2000$ Volt.

Dieses System ergab wohl den Vorteil der Anwendung hoher Spannungen und daher geringer Leitungsquerschnitte, die einzelnen Lampengruppen waren jedoch voneinander nicht unabhängig. Betrug die primäre Stromstärke beispielsweise 20 Ampère, so mußten, da das Übersetzungsverhältnis den Wert 1 : 1 hatte, in den sekundären Stromkreis, der Stromstärke von 20 Ampère entsprechend, Lampen eingeschaltet sein. Eine selbsttätige Regulierung bei veränderlichem Stromverbrauche war bei diesem Stromverteilungssystem ausgeschlossen. Die Mängel dieses, zuerst auf der Turiner Ausstellung (1884) vorgeführten Systems wurden schon während dieser Ausstellung von Colombo und Marcel Deprez erkannt.

Ein Stromverzweigungssystem, welches frei ist von obigen Übelständen stammt von Karl Zipernowsky, Max Déri und Otto Titus Bláthy in Budapest (Firma Ganz & Co.). Diese Erfindung bildet in der modernen Wechselstromtechnik eine neue Epoche glänzender Erfolge. Die zuletzt genannten Erfinder wenden Transformatoren mit in sich geschlossenen Eisenkernen, welche aus voneinander isolierten Eisenmassen bestehen, an.

Diese Transformatoren zerfallen in:

a) Kerntransformatoren, Fig. 221 und 222. Der Eisenkern dieser Transformatoren bildet eine in sich geschlossene Figur, einen Ring, ein Oval u. dgl. und ist so wie die Kerne der Dynamomaschinen zur Vermeidung von Wirbelströmen unterteilt.

Die Umwicklung des isolierten Eisenkernes mit isoliertem Kupferdrahte geschieht ebenfalls in derselben Weise, wie bei den Eisenkernen der Dynamomaschinen beziehungsweise der Elektromotoren; der Strom wird jedoch dem Ringe nicht wie bei den Dynamomaschinen an zwei gegenüberliegenden Stellen zugeführt, sondern die geschlossenen Wicklungen erscheinen zu diesem Zwecke an irgend einer Stelle des Ringes unterbrochen. Die erste (primäre) Wicklung $I\,I'$ ist in den Stromkreis einer Wechselstrommaschine, die zweite (sekundäre) $II\,II'$ in den Nutzstromkreis eingeschaltet. Der Strom durchfließt demnach den ganzen Eisenkern in derselben Richtung und bildet, im Gegensatze zu dem Strome, der den Eisenkern der Dynamomaschine umfließt, keine freien Pole. Ebenso wie bei der Dynamomaschine ist der Eisenkern bei den

Transformatoren in der Richtung der Kraftlinien ohne Unterbrechung und in der auf dieser Richtung senkrechten Richtung unterteilt.

Der Aufbau des Eisenkernes erfolgt entweder dadurch, daß Eisendrähte zu einem Ringe zusammengerollt oder daß der Eisenkern aus schmalen, flachen, hochkantig oder flach aufgewickelten Eisenbändern aufgebaut wird. Die hochkantig aufgewickelten Eisenbänder sind ineinander gesteckt, die flach aufgewickelten dagegen übereinander gelegt

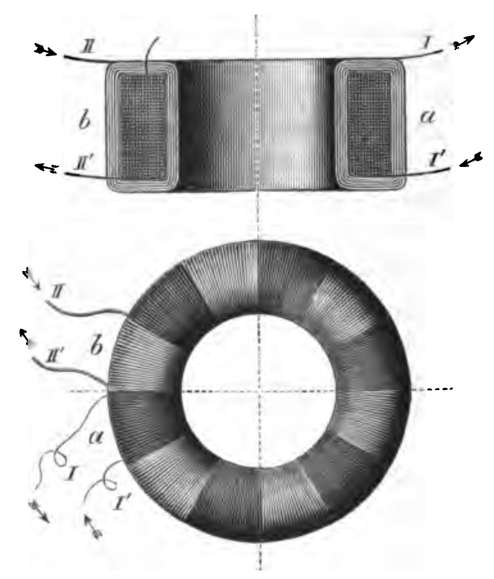


Fig. 221. Kerntransformator. Ganz & Co.

und so zu einem Ringe ausgebildet. Der Eisenkern kann auch aus einem einzigen entsprechend breiten Bande hergestellt werden, welches, zur Vermeidung von Wirbelströmen, Längsschnitte erhält. Besteht das Blech aus mehreren Teilen, dann hat man insbesondere darauf zu achten, daß die Fugen gegeneinander versetzt angeordnet werden, so daß der Eisenquerschnitt in der Richtung der Kraftlinien möglichst geschlossen erscheint.

Messungen der Erfinder haben ergeben, daß solche geringe Störungen im Zusammenhange der Eisenmassen das Güteverhältnis der Transformatoren nicht beeinflussen. Die Isolation der Drähte, Bänder oder Bleche besteht aus Umspinnung, Lack, Papier, Gewebe u. s. w.

Die Wicklung der Kerntransformatoren zerfällt entweder in zwei übereinander liegende Wicklungen (primäre und sekundäre Wicklung) oder in regelmäßig wechselnde Abteilungen von primären *a* und sekun-

dären Windungen *b*, wobei die ganze Oberfläche des Ringes entweder vollständig oder nahezu vollständig von der Wicklung eingehüllt ist.

Die Wicklung in Abteilungen veranschaulicht Fig. 221.

Fig. 222 gibt ein perspektivisches Bild eines Kerntransformators wieder, bei welchem auf den Eisenkern zunächst die primären und darauf die sekundären Windungen aufgewickelt sind.



Fig. 222. Kerntransformator. Ganz & Co.

Die Wicklungen der Transformatoren sind sowohl untereinander, als auch vom Eisenkerne sorgfältigst isoliert, so daß ein Schluß zwischen den Wicklungen oder zwischen diesen und dem Eisenkerne ausgeschlossen erscheint.

Der Eisenkern samt Wicklung wird zwischen starken, gut gefirnißten Holzklammern gefaßt und zwischen zwei ringförmigen Eisenscheiben zusammengepreßt, jedoch so, daß die Wicklungen von dem Metalle des Gestelles allseitig abstehen. Der Transformator steht auf drei Füßen, welche an die untere der beiden Eisenscheiben angegossen sind. Die obere Eisenscheibe dient als Träger zweier primärer und dreier sekundärer Klemmen samt Sicherheitsschaltungen. Die mittlere der sekundären Klemmen hat den Zweck, die sekundäre Spannung von z. B. 100 Volt in zwei Zweige zu je 50 Volt zu teilen. Durch diese Anordnung erreicht man bei Bogenlampen eine vollkommene Unabhängigkeit der einzelnen Lampen voneinander. Während bei Gleich-

strom von 100 Volt, in welchem zwei Bogenlampen hintereinander geschaltet sind, immer beide in Tätigkeit sein müssen, wenn nicht anstatt einer derselben ein ebensoviel Kraft wie die Bogenlampe selbst verbrauchender Widerstand eingeschaltet werden soll. Eine Gleichstromanlage von 100 Volt erfordert weiters eine gerade Lampenzahl, also zumindest zwei Lampen; auch diesen Übelstand behebt der Transformator mit drei sekundären Klemmen. Die Dauerbrand-Gleichstrombogenlampen (II. T., 2. B., S. 45) verbrauchen 100 Volt und können einzeln geschaltet werden, auch ist keine gerade Lampenzahl erforderlich.

Die primären Sicherungen sind in weiten, mit Holzgriffen versehenen Glasröhrchen untergebracht, so zwar, daß ein Auswechseln derselben selbst während des Betriebes stattfinden kann. Die sekundären Sicherungen bestehen aus Bleiplatten.

Sämtliche Klemmen sind auf Porzellan montiert, die primären außerdem mit ihren Porzellanplatten auf ein Holzbrett aufgeschraubt.

Behufs leichter Handhabung sind die Durchmesser der beiden Eisenscheiben so groß gewählt, daß der Transformator auf dem Boden gerollt werden kann und ein oder zwei Tragringe mit der oberen Eisenscheibe verschraubt.

Tabelle ausgeführter Transformatoren.

Leistung in Watt	Gewicht in *kg*	Energieverlust in beiden Wicklungen bei voller Leistung	Magnetisierungsarbeit in %	Kommerzieller Nutzeffekt bei voller Leistung in %
1875	70		5·5	92·5
3750	110	2%	3·5	94·5
7500	180		2·5	95·5
15000	290		1·5	96·8

Übersetzungsverhältnis: 900, 1800, 2700 und 3600 Volt primär, 105 Volt sekundär. Das Güteverhältnis gibt die Tabelle für die volle Leistung an; dasselbe ändert sich jedoch innerhalb weiter Grenzen der Belastung sehr wenig und beträgt bei $^1/_4$ Belastung beim kleinsten Modell (1875 Watt) rund 80%, beim größten (15.000 Watt) rund 91·3%. Die sekundären Spannungen bei voller Belastung und bei ausgeschaltetem sekundären Stromkreise sind einander nahezu gleich.

Die Transformatoren werden immer so untergebracht, daß sie für Unbefugte unzugänglich sind. Bei oberirdischer Leitungszuführung sind

dieselben in Kasten auf Säulen oder an den Außenwänden der Häuser auf Konsolen oder in Häusern auf dem Dachboden in verschlossenen Verschlägen aufgestellt. Bei unterirdischer Leitung befinden sich die Transformatoren in Erdkasten oder in den Kellern der zu beleuchtenden Häuser. Gegen das Eindringen von Wasser sind die letzteren dadurch geschützt, daß dasselbe durch einen Kanal Ableitung findet.

b) Manteltransformatoren, Fig. 223 und 224. Die Manteltransformatoren gehen aus der Umkehrung der Anordnung zwischen Wicklungen und Eisenkernen der Kerntransformatoren hervor. Während bei den letzteren die Eisenkerne von den Umwicklungen eingehüllt erscheinen, umgeben bei den Manteltransformatoren umgekehrt die Eisenkerne die Wicklungen. Wesentlich sind beide Konstruktionen einander gleich. Die induzierenden und induzierten Drähte werden der ganzen Länge nach von dem durch Isolation geteilten Eisen umhüllt, so zwar, daß durch die Isolation der Weg der Kraftlinien rein metallisch verbleibt, dagegen der Weg der Wirbelströme unterbrochen ist.

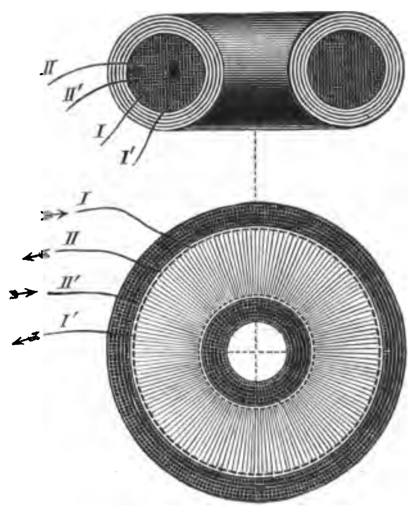


Fig. 223. Manteltransformator. Ganz & Co.

Fig 223 gibt ein Bild der Anordnung zwischen Eisen und Wicklung eines Manteltransformators wieder. Der innere Kern besteht aus einem Ringe isolierter Kupferdrähte, aus welchen die primären Windungen *I I' I I'* und die sekundären Windungen *II II' II II'* hervorragen. Senkrecht zu den Ebenen der Kupferdrähte sind isolierte Eisendrähte oder Bleche angeordnet.

Fig. 224 stellt ein perspektivisches Bild eines Manteltransformators dar.

In ihrer deutschen Patentschrift haben die genannten Erfinder ein vollständig ausgebildetes Transformatorensystem mit einer Reihe von Einzelkonstruktionen angegeben. Diesem Systeme verdankt die Wechselstromtechnik ein wirtschaftliches System der elektrischen Beleuchtung und Kraftübertragung auf große Entfernungen.



Fig. 224. M a n sformator. Ganz & Co.

Folgend sind die wichtigsten Angaben über den Kerntransformator mit der Leistung von 7500 Watt zusammengestellt:

130	*cm*²,	Eisenquerschnitt,
95	*kg*,	Gewicht des Eisens,
1080,		Primäre Windungszahl,
60,		Sekundäre Windungszahl,
1·8	*mm*,	Drahtstärke der primären Wicklung,
2·6	*mm*,	Drahtstärke der sekundären Wicklung,
4·2	Ohm,	Widerstand der primären Spule,
0·0135	Ohm,	Widerstand der sekundären Spule,
40	*kg*,	Gesamtkupfergewicht,
175	*kg*,	Gesamtgewicht,
0·17	Ampère,	Stromstärke bei geöffnetem äußeren Stromkreise,
200	Watt,	Wattverbrauch bei geöffnetem sekundären Stromkreise,
4·28	Ampère,	Normale Stromstärke bei voller Leistung,
1926	Volt,	Normale Spannung bei voller Leistung,
75	Ampère,	Normale, sekundäre Stromstärke,
105	Volt,	Normale, sekundäre Spannung.

Die Angaben bei voller Leistung wurden nach dreistündigem Betriebe gefunden. Die Temperatur der Kupferwicklung stieg um 80° C.

Eine neuere Konstruktion eines Transformators ist der sogenannte Igeltransformator von Swinburne. Diese Konstruktion schlägt einen Mittelweg zwischen dem geraden und dem kreisförmig geschlossenen Transformator ein. Die voneinander isolierten Eisenteile des Kernes sind an ihren Enden kugelförmig auseinandergebogen, so zwar, daß der Luftabstand zwischen den Polen im Vergleiche mit dem geraden Transformator verkleinert erscheint.

169. Moderne Transformatorenformen. In der Praxis verwendet man insbesondere zwei Gruppen von Transformatoren, und zwar Mantel- und Kerntransformatoren. Bei den ersteren umschließt das Eisen die Windungen, bei den letzteren dagegen umschließen die Windungen das Eisen. Der Eisenkörper ist bei sämtlichen Transformatoren, sowie bei sämtlichen Wechselstromvorrichtungen überhaupt, unterteilt, d. h. aus dünnen Eisenblechen zusammengesetzt, welche durch sehr dünnes Papier voneinander isoliert sind.

Fig. 225 [1]) veranschaulicht einen Manteltransformator. Die primären und sekundären Spulen P und S sind länglich und befinden sich ent-

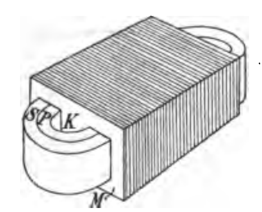


Fig. 225.
Manteltransformator.

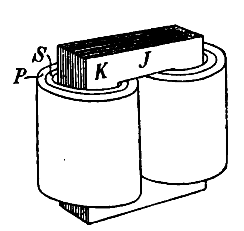


Fig. 226.
Kerntransformator.

weder ineinander oder übereinander. Der Eisenkörper besteht aus dünnen, weichen Eisenblechen und umgibt die Spulen beinahe gänzlich. Nur die halbrunden Enden der letzteren sind von dem Eisen nicht überdeckt. Aus den Blechen sind zwei Fenster herausgenommen, durch welche die Spulen führen. Zwischen den zwei Fenstern liegen die mittleren Blechstreifen K, welche den eigentlichen Kern der Spulen bilden. Der Teil des Eisenkörpers M, der die Spulen umgibt, stellt den Mantel des Transformators vor.

Fig. 226 gibt einen Kerntransformator wieder. Der Eisenkörper ist ebenfalls aus Eisenblechen zusammengesetzt und besteht aus den eigentlichen Kernen K und aus dem Joch J. Die Kerne haben einen

---

[1]) Die Figuren 221 bis 225 entstammen dem Werke über Transformatoren von Gisbert Kapp.

quadratischen oder rechteckigen Qnerschnitt. Die primären und sekundären Spulen P und S können ineinander oder übereinander liegen.

Die Dreiphasentransformatoren können aus drei Einphasentransformatoren zusammengesetzt werden. In diesem Falle erhält jede Phase einen eigenen Transformator. Man kann aber auch die Spulen auf einen gemeinschaftlichen Eisenkörper, Fig. 227 bis 229, unterbringen. In Fig. 227 stellen K die Eisenkerne dar, auf welche die Spulen aufgeschoben werden, und J die aus Blechscheiben gebildeten Jochstücke. Gußplatten drücken die an den Enden abgeschrägten Kerne gegen die Jochscheiben. Eine andere Form der Jochstücke zeigt Fig. 228. Die Jochbleche werden zwischen Wangen der oberen und unteren Endplatte gehalten. Die seitlichen Deckplatten der Kerne bestehen aus Rotguß und tragen Nasen. Letztere greifen in Aussparungen der Jochwangen ein, so daß die Kerne zusammengehalten werden. In Fig. 229 sind wieder durch die Buchstaben K die Kerne, durch die Buchstaben J die Joche ersichtlich gemacht. Jeder Kern wird von einer primären und einer sekundären Spule, welche zu einer Phase gehören, umgeben.

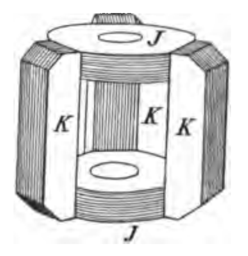


Fig. 227.
Dreiphasen-Kerntransformator.

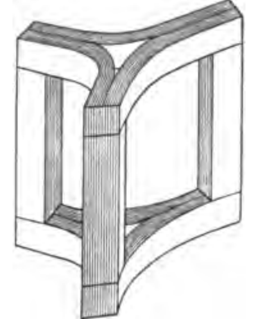


Fig. 228.
Dreiphasen-Kerntransformator.

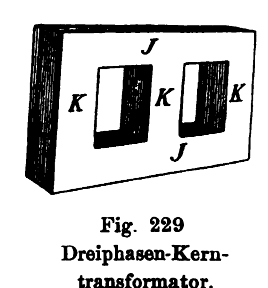


Fig. 229
Dreiphasen-Kerntransformator.

Verwenden wir für Dreiphasentransformatoren drei Einphasentransformatoren, so entfällt auf jeden der drei Transformatoren nur ein Drittel der Leistung. Günstiger erweisen sich die in den Figuren 227 und 229 wiedergegebenen Bauarten. Fig. 229 ist sehr einfach, Fig. 228 hat ein geringeres Eisengewicht, Fig. 227 ist auch einfach, besitzt jedoch den Nachteil, daß sich die Trennungsflächen der Bleche in Joch und Kern rechtwinklig kreuzen.

170. Grundlehren. Die Grundgleichung für den Transformator: $EMK = 4{\cdot}44\, Z N \,.\, \sim \,.\, 10^{-8}$ wurde bereits (S. 134) entwickelt. Für jeden Induktionsapparat findet man in einfachster Weise durch Versuche folgendes Gesetz:

Die elektromotorische Kraft wächst mit der Stärke des primären Stromes, der Zahl der Windungen auf der sekundären Spule und der Geschwindigkeit der primären Stromänderungen.

Ist die Anzahl der primären und sekundären Windungen einander gleich, dann ist auch die sekundäre *EMK* — bis auf geringe Verluste, die später berücksichtigt werden sollen — gleich der primären. Steigt die Anzahl der sekundären Windungen, so steigt auch die sekundäre *EMK*. Durch Vermehrung der sekundären Windungen kann man demnach die sekundäre *EMK* beliebig erhöhen. Es gilt demnach folgende Beziehung:

Ist die sekundäre Windungszahl gleich der primären, so muß auch die sekundäre *EMK* gleich der primären sein, ist die sekundäre Windungszahl gleich der doppelten primären, so muß auch die sekundäre *EMK* gleich der doppelten primären sein u. s. w.

Das Verhältnis der primären und sekundären *EMK* bestimmt somit das Verhältnis der Windungszahlen der beiden Wicklungen.

Man nennt nun das Verhältnis der Anzahl der primären Windungen zu der Anzahl der sekundären Windungen das Umsetzungsverhältnis (Koeffizient der Umsetzung oder Transformationskoeffizient) des Transformators, d. h.

$$\text{Umsetzungsverhältnis } p = \frac{\text{Zahl der primären Windungen } S_1}{\text{Zahl der sekundären Windungen } S_2}.$$

Sei die primäre *EMK* E_1, die sekundäre E_2, so erhalten wir, da das Verhältnis der Windungen gleich ist dem Verhältnisse der *EMK*, die Gleichung

$$p = \frac{S_1}{S_2} = \frac{E_1}{E_2}.$$

Transformatoren mit dem Umsetzungsverhältnisse 1 : 1 (primäre *EMK* gleich sekundärer *EMK*) haben nur für die Hintereinanderschaltung derselben eine Bedeutung. Arbeitet z. B. eine Wechselstromanlage mit 1000 Volt, so kann man zehn Transformatoren zu je 100 Volt hintereinander schalten und aus den sekundären Windungen je 100 Volt entnehmen. Diese Schaltung gewährt deshalb die Vorteile der höheren Spannung; da jedoch sämtliche primäre Windungen der Transformatoren hintereinander geschaltet sind, erhalten dieselben immer den gleichen Strom, abgesehen davon, ob sich in dem sekundären Stromkreise Stromabnehmer befinden oder nicht. Hintereinander geschaltete Transformatoren geben demnach nur dann ein entsprechendes Güteverhältnis, wenn sämtliche Stromabnehmer (Lampen, Motoren u. s. w.) in Tätigkeit sind.

Transformatoren mit dem Umsetzungsverhältnisse 1 : 1 in Hintereinanderschaltung wurden zuerst von G a u l a r d & G i b b s, Transformatoren mit jedem beliebigen Umsetzungsverhältnisse, in Nebeneinanderschaltung und mit wirtschaftlichem Betriebe bei beliebigen Belastungen, von G a n z & C o. in die Praxis eingeführt.

Der Eisenkern der Transformatoren hat den Zweck, die magnetischen Kraftlinien zu leiten und dadurch die Induktionsströme zu verstärken.

Der Wechsel der Stromrichtung in der primären Spule bewirkt die Magnetisierung des Eisenkernes in wechselnder Richtung und die Erzeugung von Induktionsströmen in der sekundären Spule. Durch den Wechsel des Magnetismus werden in der sekundären Spule Induktionsströme erzeugt, welche die durch den primären Strom erzeugten verstärken.

Bei den Sekundärgeneratoren von G a u l a r d & G i b b s sind die Eisenkerne verstellbar eingerichtet, so daß dieselben mehr oder weniger aus den Spulen herausgezogen werden können. Dadurch, daß mehr oder weniger Eisenmassen wirken, erscheinen die Stromverhältnisse regulierbar.

Hintereinander geschaltete Transformatoren durchfließt nach obigem immer derselbe primäre Strom, nebeneinander geschaltete jedoch ändern den primären Strom mit den verschiedenen Belastungen des sekundären Stromkreises. Bei den hintereinander geschalteten Transformatoren fließt der Strom von einem Transformator in den zweiten, dritten u. s. w., sämtliche primäre Windungen sind bei den verschiedensten Belastungen von demselben Strome durchflossen; nebeneinander geschaltete Transformatoren sind nicht von demselben Strome, sondern von nebeneinander geschalteten Zweigströmen durchflossen. In letzterem Falle erfolgt die selbsttätige Regulierung des Transformators in folgender Weise: Der geöffnete sekundäre Stromkreis hat keinen Einfluß auf die Tätigkeit des Apparates. Der primäre Strom magnetisiert den Eisenkern in wechselnder Richtung. Durch den wechselnden Magnetismus werden in den primären Windungen elektromotorische Kräfte wechselnder Richtung erzeugt, welche dem primären Strome entgegengesetzt gerichtet sind. Diese Ströme schwächen den primären Strom und setzen so die primäre Stromstärke bei geöffneten sekundären Windungen herab, so zwar, daß diese Stromstärke einen sehr kleinen Wert erhält.

Schließt man den sekundären Stromkreis (z. B. durch das Einschalten von Lampen in denselben), so wird derselbe von Induktionsströmen durchflossen. Steigt die primäre Stromstärke, so steigt auch die sekundäre, die Richtungen des primären und sekundären Stromes

sind jedoch, nach den Regeln der Induktion (I. T., 1. B., S. 61), einander entgegengesetzt. Der durch beide Ströme hervorgerufene Magnetismus muß demnach durch den Unterschied in den Ampèrewindungen der beiden Stromkreise bestimmt sein. Die durch den resultierenden Magnetismus in den primären Windungen erzeugte elektromotorische Kraft wird geringer als bei geöffnetem sekundären Stromkreise und es muß deshalb die Stromstärke in den primären Windungen ansteigen.

171. Verluste in Transformatoren. Durch den Transformator geht ein Teil der zu übersetzenden Watt verloren. Die gesamten verlorenen Watt setzen sich aus folgenden Verlusten zusammen:

1. Verluste durch den Widerstand der Wicklungen. Diese Verluste betragen etwa 2% und sind um so größer, je kleiner der Transformator ist.

2. Magnetisierungsverluste. Für praktische Zwecke kann man diese Verluste rund mit 2% annehmen. Die Magnetisierungsarbeit steigt mit zunehmender Polwechselzahl und ist nach Chas. Prot. Steinmetz der 1·6 Potenz der Magnetisierung proportional.

Bestimmung des Steinmetzkoeffizienten (Hysteresiskoeffizienten) an einem Einphasentransformator von 3·5 *KVA* Leistung bei 50 Perioden und 2200 primären Windungen:

Gemessen wurden:

Ampère primär	=	0·73	Ampère,
Ampère sekundär	=	29·2	„
Widerstand primär	=	66	Ohm,
sekundär	=	0·033	„ .
Cu-Verluste: primär $= 66 \cdot 0{\cdot}73^2$	=	35·2	Watt,
sekundär $0{\cdot}033 \cdot 29{\cdot}2^2$	=	28·2	„
		63·4	Watt.
Eisenverluste = Leerlaufswatt	=	220·0	„
Zusammen		283·4	Watt.
Spannung primär	=	5150	Volt.

Nach früherem (S. 135) ist $EMK = 4{\cdot}44 \cdot Z \cdot N \cdot \sim \cdot 10^{-8}$, worin $N = B \cdot Q$, wenn B = Induktion und Q = Eisenquerschnitt in Quadratzentimetern.

Sind die Eisenabmessungen 9 *cm* . 22·5 *cm*, so wird der Eisenquerschnitt Q wegen der Papierzwischenlagen kleiner sein, und zwar im Verhältnisse $\frac{\text{Blech}}{\text{Blech} + \text{Papier}} = \frac{0{\cdot}3}{0{\cdot}3 + 0{\cdot}04} = \frac{0{\cdot}3}{0{\cdot}34}$,

also $Q = \frac{0{\cdot}30}{0{\cdot}34} \cdot 9 \cdot 22{\cdot}5 = 178\ cm^2$.

Somit erhalten wir: $5150 = 4{\cdot}44 \,.\, 2200 \,.\, B \,.\, 178 \,.\, 10^{-8}$ und $B = 5930$.

Das Eisenvolumen ist 9600 cm^3 und da der Eisenverlust nach obigem 220 Watt beträgt, erhalten wir: $\frac{220}{9600} = 0{\cdot}023$ Watt für 1 cm^3.

Bedeutet η den Hysteresiskoeffizienten und $\sim$ die Periodenzahl, so lautet die empirische Formel von Steinmetz:

Watt für 1 $cm^3 = \eta\, B^{1{\cdot}6} \,.\, \sim \,.\, 10^{-7} = \eta \,.\, 5930^{1{\cdot}6} \,.\, 50 \,.\, 10^{-7} = 0{\cdot}023$, daher $\eta = 0{\cdot}0042$. Das ist schlechtes Blech, denn für gutes Blech wird $\eta = 0{\cdot}002$. Ebenso bestimmt man η bei sämtlichen elektrotechnischen Vorrichtungen (Dynamo, Motoren, Drosselspulen u. s. w.).

Steinmetz setzt den Verlust für einen Zyklus $A = \eta\, B^x$ und fand aus den Versuchen den Exponenten $x = 1{\cdot}6$, daher ist der Wattverlust für $\sim$ Perioden und ein Volumen V

$$V = \eta\, B^{1{\cdot}6} \sim V\, 10^{-7} \text{ Watt,}$$

wobei V in Kubikzentimetern gegeben ist.

Setzen wir P_h = Wattverlust durch Hysteresis, so folgt daraus die Formel für das Volumen:

$$V = \frac{10^{-7}\, P_h}{\eta\, B^{1{\cdot}6} \sim}.$$

3. Die Verluste infolge der Wirbelströme im Kupfer und Eisen des Transformators. Der Verlust durch Wirbelströme im Eisen ist kleiner als 1%, der Verlust, verursacht durch Wirbelströme im Kupfer, kann dagegen praktisch vernachlässigt werden. Der Verlust durch Wirbelströme wächst im quadratischen Verhältnisse mit der Polwechselzahl und der Feldstärke (S. 359).

Den geringsten Spannungsverlust geben Transformatoren mit geringen Kupferverlusten (viel Eisen und wenig Kupfer), den besten Jahreswirkungsgrad dagegen Transformatoren mit geringen Eisenverlusten (viel Kupfer und wenig Eisen).

Fig. 230 stammt aus Untersuchungen von Kolben;[1] sie gibt die Verluste an, welche in Eisenblech von 0·5 *mm* Stärke durch Hysteresis und Wirbelstrom hervorgebracht werden. Als Abszissen sind die Watt für 1 dm^3, als Ordinaten die magnetischen Induktionen B (Anzahl der Kraftlinien für 1 cm^2 im Eisen) aufgetragen. Die beiden Kurven gelten für 5000 beziehungsweise 6000 Polwechsel in der Minute.

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1894, S. 77.

172. Erwärmung der Transformatoren. Ein Teil der vom Transformator während des Betriebes aufgenommenen Leistung wird in Wärme umgesetzt. Gisbert K a p p hat durch umfassende Versuche über die Erwärmung von Transformatoren bei verschiedenen Belastungen die Abhängigkeit zwischen Temperaturerhöhung und Abkühlungsfläche für 1 Watt Verlust festgestellt. Sämtliche Transformatoren waren in gußeiserne Gehäuse, mit oder ohne Öl, eingesetzt. Die Ergebnisse dieser Versuche sind durch Kurven, Fig. 231, wiedergegeben. In einem großen Raume standen die Gehäuse auf einem zementartigen Boden, so daß von allen Seiten Luft zutreten und Wärme auch in den Boden abfließen konnte. Die Temperaturerhöhung würde sich bei Aufstellung im Freien etwas kleiner, bei Aufstellung in beengten Räumen etwas größer ergeben, als die Kurven anzeigen. Mechanische Mittel zum Umlauf bei Ölfüllung wurden nicht verwendet. Die durch die Kurven bestimmten Werte gelten für Dauerbetrieb bei Vollbelastung. Die meisten Transformatoren für Beleuchtung sind dauernd im Betrieb, aber nicht vollbelastet. In Fig. 231 sind als Abszissen die Abkühlungsoberflächen in Quadratzentimetern für 1 Watt Effektverlust und als Ordinaten die Temperaturerhöhungen über die äußere Luft in Graden Celsius angegeben.

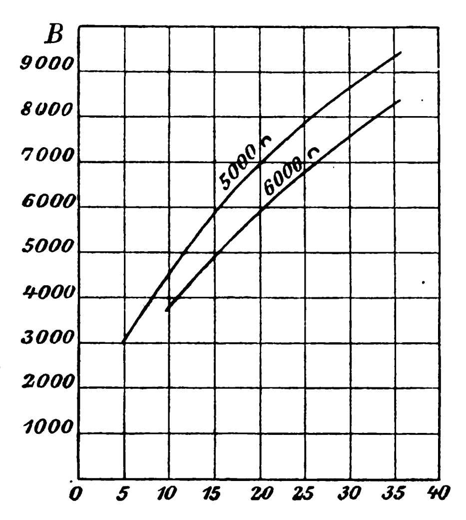


Fig. 230. Hysteresis und Wirbelstromverluste.

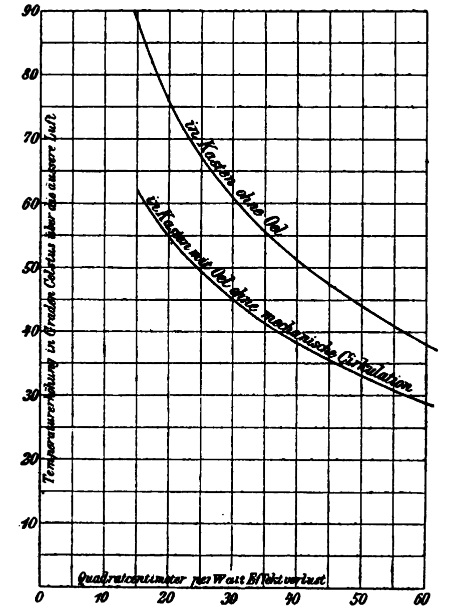


Fig. 231. Erwärmung der Transformatoren.

173. Praktische Regeln. Die Zahl der Kraftlinien im Eisen der Transformatoren beträgt 1000 bis 10.000 *C G S* Einheiten für 1 cm^2. Bei mehr als 10.000 *C G S* Einheiten singt der Transformator und wird heiß.

Bei den Transformatoren von Ganz & Co. kann der primäre Spannungsverlust mit 0·6 bis 1%, der sekundäre mit 1 bis 1·1% angenommen werden.

Die Abkühlungsfläche muß mindestens 20 cm^2 für 1 Watt betragen, Fig. 231.

Die folgende Zusammenstellung gibt die Polwechselzahl in der Sekunde bei einigen praktisch ausgeführten Transformatoren an.

Zipernowsky	84	Mordey	200
Westinghouse (Bogenlicht)	120	Brush	220
Ferranti	134	Thomson-Houston	250
Kapp	160	Westinghouse (Glühlicht)	266
Lowrie Parker	176		

Für ein bestimmtes Kupfergewicht wächst die Leistungsfähigkeit eines Transformators mit der Anzahl der Polwechsel; dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß eine größere Polwechselzahl eine Vermehrung des Eisens erfordert, so, daß rund 100 Polwechsel in der Sekunde bisher als am zweckentsprechendsten angesehen werden.

Sollen Transformatoren nur sehr geringe Spannungsdifferenzen abgeben, so müssen dieselben mit möglichst geringem Kupferverluste, dafür aber mit um so größerem Eisenverluste arbeiten.

174. Bau der Transformatoren. Jeder Transformator kann als eine Dynamomaschine angesehen werden, in welcher Anker und Magnete feststehen. Die primäre Wicklung des Transformators stellt die Wicklung der Feldmagnete, die sekundäre dagegen die Wicklung des Ankers einer Dynamomaschine vor. Die Induktionsströme werden in der Dynamo durch Bewegung, im Transformator dagegen dadurch erzeugt, daß der Strom in den primären Windungen seine Richtung wechselt.

Für den Bau der Transformatoren gelten viele Regeln, welche beim Baue der Dynamomaschinen beziehungsweise Elektromotoren Anwendung finden (I. T., 2. B., S. 234 ff.). Der Eisenkern der Transformatoren wird so aufgebaut, wie jener der Dynamomaschinen (I. T., 2. B., S. 134). Die Eisenbleche sind nach J. A. Ewing[1]) 0·25 bis 0·35 *mm* stark zu wählen. So wie bei den Dynamomaschinen verwendet man bei den Transformatoren als Isolator zwischen den Blechscheiben zu-

[1]) Magneticinduction in iron and other metals.

meist Seidenpapier. Für die Isolation der Transformatoren überhaupt und die Beanspruchung der Wicklungen gelten ähnliche Regeln wie bei den Dynamomaschinen.

175. Leitungsanschlüsse an Wechsel- und Drehstromtransformatoren. Bei solchen Anschlüssen dürfen sekundär nur phasengleiche Klemmen verbunden werden. Um Kurzschlüsse zu vermeiden, muß man vor dem Anschlüsse der Leitungen an die Transformatoren die zusammengehörigen Klemmen ermitteln. Allerdings sollen die letzteren in der Fabrik entsprechend bezeichnet und auf der Installation nur überprüft werden. Die in diesem Falle zu treffenden Schaltungen veranschaulichen die Figuren 232 und 233. Die Transformatoren werden zu diesem Zwecke in der Hochspannung parallel geschaltet. $W\,T_1$

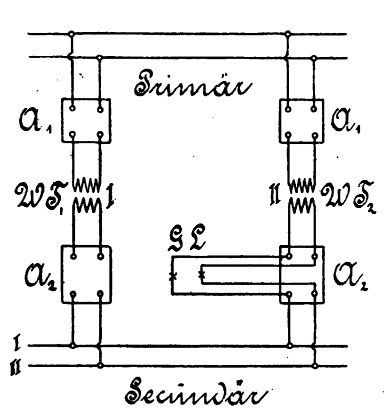


Fig. 232. Leitungsanschluß. Einphasentransformator.

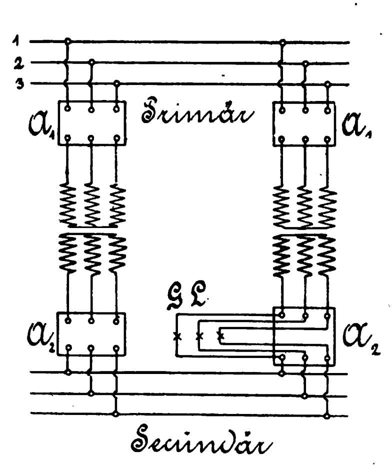


Fig. 233. Leitungsanschluß Dreiphasentransformator.

und $W\,T_2$, Fig. 232, stellen Wechselstromtransformatoren vor. An Stelle derselben befinden sich in Fig. 233 Drehstromtransformatoren. Die Ausschalter sind mit A_1 und A_2 bezeichnet. Die Sicherungen, welche sich an der Abzweigstelle befinden müssen, wurden in den Figuren nicht eingezeichnet. Sie befinden sich zwischen den Ausschaltern A_1 und A_2 und zwischen den primären Leitungen, nächst letzteren. Der Strom tritt aus den Leitungen in die Transformatoren $W\,T_1$ und $W\,T_2$, aus welchen die sekundären Leitungen den Strom erhalten. An demjenigen Transformator, welcher zu untersuchen ist, sind die Klemmen des sekundären Ausschalters A_2 durch Glühlampen $G\,L$ miteinander verbunden. Die Glühlampen werden auf ein eigenes Brett aufmontiert. Die Spannung der verwendeten Lampen muß der Netzspannung gleich sein. Ist

letztere sehr groß, so sind mehrere Glühlampen anstatt einer hintereinander zu schalten. Bei richtigem Anschlusse der Klemmen des Transformators verbleiben die Lampen nach dem Einschalten ihres Ausschalters A_1 dunkel. Leuchten zwei oder alle drei Lampen hell auf, so vertauscht man die Klemmenverbindungen des zu prüfenden Transformators so lange, bis die Lampen erlöschen.

Drehstromtransformatoren kennen nur dann primär und sekundär parallel geschaltet werden, wenn die Verkettung ihrer Wicklungen primär und sekundär dieselbe ist. Sie müssen primär und sekundär in Stern oder primär und sekundär in Dreieck geschaltet sein. Wenn der eine Transformator primär und sekundär in Stern geschaltet ist, so darf der zweite nicht primär im Dreieck und sekundär in Stern geschaltet sein.

Die Schaltung der Transformatoren ist an anderer Stelle (II. T., 2. B., S. 237) wiedergegeben.

176. Aufstellung der Wechsel- und Drehstromtransformatoren. Die Transformatoren müssen in verschlossenen Räumen, welche für Unberufene unzugänglich sind, aufgestellt werden. Da die primären Klemmen hochgespannten Strom führen, dürfen dieselben nicht berührt werden. Auch die primären Leitungen muß man derart verlegen, daß Unberufene vor einer Berührung derselben vollkommen geschützt sind. Das Eisengestell des Transformators hat man entweder zu erden oder es muß ein gut isolierter Fußboden um den Transformator vorhanden sein. In letzterem Falle ist man bei einem Berühren des Transformatorgestelles von der Erde isoliert. Um ein stark vibrierendes Geräusch zu vermeiden, sind die eisernen Schlußstücke der Transformatoren fest anzuziehen.

Die Aufstellung der Transformatoren erfolgt entweder in den stromverbrauchenden Gebäuden oder für mehrere Gebäude von einem möglichst in der Mitte derselben gelegenen Orte aus.

Falls die Transformatoren im Netze parallel geschaltet werden, führt man in jeden Transformatorraum in der Regel mehrere Hoch- und Niederspannungskabel ein und bringt zwei gesonderte Schalttafeln an. Die Kabel müssen für jeden Leiter mit Endverschlüssen versehen und durch Ausschalten *U U*, Fig. 234, ausschaltbar sein. Sämtliche Leiter sind durch Sicherungen *S* gesichert. Alle Kabelenden müssen deutlich sichtbar markiert werden. Man bezeichnet z. B. die Hochspannungskabel mit arabischen Zahlen 1, 2, Fig. 234, die Niederspannungskabel mit römischen Zahlen I, II und numeriert die betreffenden Kabel in den miteinander verbundenen Transformatorräumen gleich.

a, *b* und *c* geben die primären, *A*, *B* und *C* die sekundären Leitungen wieder. Die Aufstellung der Transformatoren außerhalb der Gebäude findet entweder über den Erdboden auf Transformatorsäulen oder unterirdisch statt. Die Gehäuse der Transformatorsäulen müssen gut gelüftet und gegen Regen und Schnee dicht abgeschlossen sein. Unterirdische Räume für Transformatoren sind gut zu entwässern und mit sorgfältigen Türverschlüssen zu versehen. Eiserne Gehäuse müssen geerdet werden.

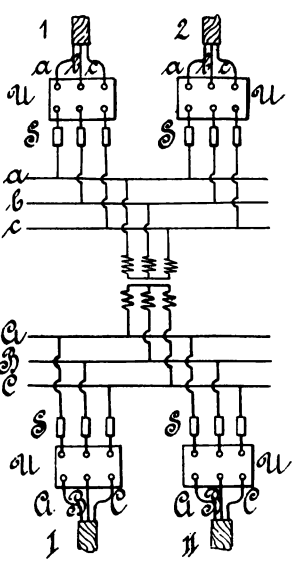


Fig. 234. Aufstellung der Transformatoren.

177. Spannungserhöher (Booster). Diese Vorrichtungen wurden gleichzeitig von Gisbert Kapp in England und von Stillwell in Amerika erfunden. In Wechselstromanlagen mit langen Speiseleitungen werden manchmal außen den Transformatoren in den Unterstationen auch kleine Transformatoren in der Zentralstation selbst verwendet. Diese sogenannten Spannungserhöher haben den Zweck, die Spannung in jeder Speiseleitung um denselben Betrag zu erhöhen, welcher durch den Ohmschen Spannungsabfall in der Speiseleitung, sowie den Verteilungsleitungen und den Spannungsabfall im Transformator am Ende der Speiseleitung verloren geht. Fig. 235 zeigt die Anordnung eines Spannungserhöhers. *C* bezeichnet die Sammelschienen in der Zentrale, *S* eine der Speiseleitungen, *F* den dazugehörigen Transformator, *V* die von demselben mit Strom versorgte Verteilungsleitung, *B* den Spannungserhöher und *s* einen Mehrfachschalter. Die primäre Wicklung des Spannungserhöhers *B* ist unmittelbar an die Sammelschienen angeschlossen. Die sekundäre Wicklung des Spannungserhöhers *B* erscheint in Gruppen unterteilt und durch den Mehrfachschalter an den Leiter *S* angeschlossen. Der zweite Leiter *S* ist unmittelbar mit den Sammelschienen verbunden. Meß- und Kontrollvorrichtungen wurden in der Zeichnung weggelassen. Der Spannungserhöher ist nach obigem dauernd eingeschaltet. Die sekundäre Wicklung desselben wird so bemessen, daß sie den größtmöglichen Spannungsverlust ausgleichen kann. Ist die betreffende Speiseleitung voll belastet, so steht der Hebel des Spannungserhöhers auf dem obersten Knopf und es sind alle sekundären Windungen mit der Speiseleitung hintereinander geschaltet. Fällt die Belastung, so rückt man den Hebel nach abwärts und schaltet dadurch

nur mehr einen Teil der sekundären Windungen ein. In der Stellung des Hebels, Fig. 235, ist die sekundäre Wicklung gänzlich ausgeschaltet und die Spannung am Anfang der Speiseleitung hat denselben Wert, wie jene zwischen den Sammelschienen. Letztere Stellung wird dann erforderlich sein, wenn der geringste Stromverbrauch eintritt. Mit steigendem Stromverbrauche stellt man den Hebel schrittweise auf die höheren Kontakte. Auf diese Weise ergibt sich bei allen Belastungen konstante Spannung. Die Einstellung des Hebels kann von Hand nach dem Stromzeiger in der Speiseleitung erfolgen, weil ja der Spannungsabfall von der Stromstärke in der Speiseleitung abhängt. Diese Einstellung kann jedoch auch dadurch vorgenommen werden, daß man von der Unterstation Prüfdrähte nach der Zentrale führt und an einen Spannungszeiger anschließt, nach dessen Anzeigen die Einstellung statt-

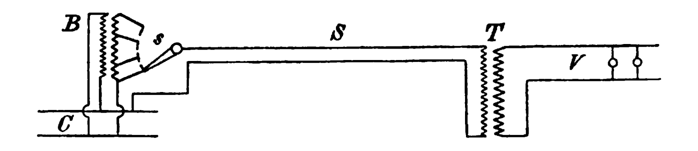


Fig. 235. Spannungserhöher. Gisbert Kapp.

findet. In dem letzteren Falle kann die Einstellung des Schalters mittels Relais und Elektromotor auch selbsttätig vor sich gehen. Der Schalthebel muß wie bei Zellenschaltern (II. T., 4. B., S. 95) aus zwei isolierten Teilen zusammengesetzt sein. Die beiden Teile sind durch einen Ohmschen Widerstand überbrückt. Dadurch wird beim Übergang von einem Kontakt auf den anderen sowohl Stromunterbrechung als auch Kurzschluß einer sekundären Windungsgruppe vermieden.

Durch den Mehrfachschalter fließt der ganze Speisestrom. Dadurch wird die Betriebssicherheit herabgedrückt. Tritt am Schalter eine Störung ein, so wird die ganze Speiseleitung S und der Transformator T außer Betrieb gesetzt. Zur Vermeidung dieses Übelstandes kann der Spannungserhöher, so wie es Fig. 236 zeigt, angenommen werden. Wie man aus dieser Figur ersieht, befindet sich dann der Mehrfachschalter in der Primärspule. Die Sekundärspule ist fest mit den Speiseleitungen verbunden, so daß die Hauptleitung durch den Schalter nicht unterbrochen werden kann. Die Primärspule besteht aus den Gruppen a, b, c, d und e. Die erste Gruppe a enthält noch so viele Windungen, daß die Induktion die Grenzen nicht übersteigt, welche durch die Erhitzung der Vorrichtung gegeben sind. In der tiefsten Stellung des Schalters besitzt die Induktion einen Höchstwert und daher auch die in

der sekundären Spule der Vorrichtung induzierte *EMK*. Steht der Hebel höher, so wächst die primäre Windungszahl, die Induktion nimmt ab und die Spannungserhöhung wird kleiner. Auf diese Weise kann man durch die richtige Einstellung des Schalters die Verteilungsspannung, soweit es für die Praxis erforderlich ist, konstant erhalten. Da sich der Schalter im Primärkreis befindet, kann derselbe für eine geringe Stromstärke gebaut werden und ist billiger. Der Transformator dagegen wird etwas größer, weil die erste Gruppe *a* aus so viel Windungen bestehen muß, als in Fig. 235 die ganze Spule. Dazu kommen noch die anderen Gruppen, welche allerdings aus dünnerem Drahte bestehen. Es gibt noch eine dritte Konstruktion ohne jeden Schalter. Letztere Vorrichtung stellt eine zweipolige Dynamo dar, deren Anker und Magnetgestell aus Blechen bestehen. Die Feldspulen sind unmittelbar an die Sammelschienen angeschlossen und bilden die Primärwicklung. Die Sekundärwicklung bildet die eine Ankerspule. Letztere wird durch biegsame Leitungen mit der Speiseleitung hintereinander geschaltet. Je nachdem man die Ankerspule durch Drehen des Ankers, z. B. durch ein Schneckenrad, in verschiedene Stellungen bringt, gehen verschiedene Kraftlinienzahlen durch die Spule hindurch. Durchsetzen letztere am meisten Kraftlinien, so hat die Spannungserhöhung einen Höchstwert.

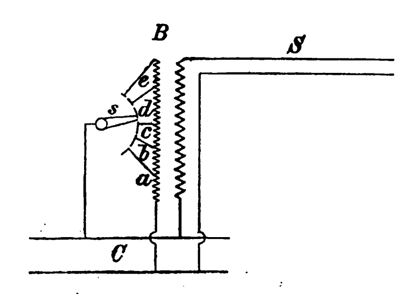


Fig. 236. Spannungserhöher. Gisbert Kapp.

Gehen durch die Spule keine Kraftlinien hindurch, dann ist die Spannungserhöhung gleich *O*. Dreht man über 90°, so kann man damit auch die Spannung vermindern. Der Anschluß der Ankerspulen geschieht entweder durch Schleifringe oder durch bewegliche Drähte. Man kann aber auch die Ankerspule gerade so wie die Magnetspulen festlegen und nur den Eisenkern drehen.

Zur Erhöhung oder Verminderung der Spannung in einer Drehstromleitung kann man die drei Phasen des Ankers eines Drehstrommotors mit der Leitung hintereinander schalten. Der Anker wird dabei durch Handrad und Schneckenantrieb in eine bestimmte Lage eingestellt. Die Feldwicklung des Drehstrommotors liegt im Nebenschluß zur Stromquelle. Der Drehstrommotor mit fest eingestelltem Anker stellt einen Transformator dar. Ein solcher Transformator kann auch zur Regulierung der Spannung eines Gleichstrom-Wechselstrom-Umformers verwendet werden. Da bei großen Vorrichtungen viel Kraft zum Ein-

stellen erforderlich ist, hat die Siemens & Halske A.-G. bei den Reguliertransformatoren für die Anlage im Paderno zwei solche Transformatoren nebeneinander gestellt und die Anker mechanisch miteinander gekuppelt.

178. Berechnung der Transformatoren. Für die Berechnung des Eisenkörpers ist die zulässige Induktion maßgebend. Die Anzahl der Kraftlinien für 1 cm^2 beträgt bei den meisten Transformatoren 4000 bis 8000 *C G S*-Einheiten.

Da ein Teil des Gesamteisenquerschnittes des Transformators durch die Isolation (Seidenpapier u. s. w.) verloren geht, rechnet man in der Regel, so wie bei den Dynamomaschinen, mit 0·9 des Gesamtquerschnittes als dem wirksamen Querschnitte.

Als Beanspruchung der primären und sekundären Wicklung (Stromdichte) wählt man für Kupferdrähte etwa 1·2 Ampère für 1 mm^2.

Das Verhältnis der Spannungen ist nach § 170 durch das Verhältnis der Anzahl der primären und sekundären Windungen bestimmt.

Beispiel: Ein Transformator soll im Verhältnisse 20 : 1 umsetzen. Wie groß ist die Anzahl der sekundären Windungen, wenn die Anzahl der primären 800 beträgt? Die Anzahl der sekundären Windungen muß dann 800 : 20 = 40 Windungen sein.

179. Bezeichnungen zur Berechnung der Transformatoren.

VA = Voltampère.
KVA = Kilovoltampère.
E_p = Primäre Spannung.
E_s = Sekundäre Spannung.
$\sim$ = Periodenzahl in einer Minute.
$\triangle$ = Blechdicke in Millimetern.
δ = Papierdicke in Millimetern.
$2a$ = Kernabmessung in Zentimetern, Fig. 237.
b = Kernabmessung.
η = Hysteresiskoeffizient.
B = Anzahl der Kraftlinien für 1 cm^2 im Eisen.
P = Leistung.
P_h = Hysteresisverlust in Watt.
P_w = Wirbelstromverlust in Watt.
P_k = Kupferverlust in Watt.
P_{kp} = Kupferverlust primär in Watt.
P_{ks} = Kupferverlust sekundär in Watt.
V = Volumen.
S_b = Blechfläche in Quadratzentimetern.
H_b = Höhe des Blechpaketes.
Q_e = Eisenquerschnitt in Quadratzentimetern.

Q_p = Drahtquerschnitt primär in Quadratmillimetern.
Q_s = Drahtquerschnitt sekundär in Quadratmillimetern.
Z_p = Windungen primär.
Z_s = Windungen sekundär.
λ = Mittlere Länge der Windungen in Metern.
J_p = Stromstärke primär in Ampère.
J_s = Stromstärke sekundär in Ampère.
W_p = Widerstand primär in Ohm.
W_s = Widerstand sekundär in Ohm.
γ = Leitungsfähigkeit.
K = Koeffizient.
h = Wirkungsgrad.
j_p = Beanspruchung primär in Ampère.
j_s = Beanspruchung sekundär in Ampère.

180. Formeln zur Berechnung der Transformatoren. Den Hysteresisverlust P_h findet man[1]) nach der erfahrungsgemäßen Formel:

$$P_h = \frac{\eta \, B^{1\cdot 6} \sim V}{10^7} \text{ in Watt} \quad . \; . \; . \quad I$$

oder wenn man das Eisen in Kern und Joch zerlegt:

$$P_h = \eta \sim 10^{-7} \, (B_k^{1\cdot 6} \, V_k + B_j^{1\cdot 6} \, V_j) \text{ in Watt} \quad . \; . \; . \quad I_1.$$

Somit ist $$V_e = \frac{10^7 \, P_h}{\eta \, B^{1\cdot 6} \sim} \text{ in Kubikzentimetern} \quad . \; . \; . \quad I_2.$$

Die Höhe des Blechpaketes $H = \frac{V_e}{S_b}$. Da die Bleche jedoch durch dünnes Papier voneinander isoliert sind, müssen wir noch mit $\frac{\Delta + \delta}{\Delta}$ multiplizieren, d. h.:

$$H_b = \frac{V_e \, (\Delta + \delta)}{S_b \, \Delta} \quad . \; . \; . \quad II.$$

Aus dem letzteren Grunde ist der Eisenquerschnitt, Fig. 237, nicht $= 2\,a\,b$, sondern:

$$Q_e = \frac{2\,a\,b\,\Delta}{\Delta + \delta} \quad . \; . \; . \quad III.$$

Den Wirbelstromverlust P_w rechnet man nach der erfahrungsgemäßen Formel:

$$P_w = \left(\frac{\Delta \, B \sim}{10^6 \, K}\right)^2 V_e \text{ in Watt} \quad . \; . \; . \quad IV$$

oder wenn man das Eisen in Kern und Joch zerlegt:

$$P_w = \left(\frac{\Delta \sim}{10^6 \, K}\right)^2 (B_k^2 \, V_k + B_j^2 \, V_j) \quad . \; . \; . \quad IV_1.$$

[1]) Siehe auch Wilhelm Peukert: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 674.

K ist ein Erfahrungskoeffizient, man kann setzen: $K = 2{\cdot}5$.

Nach früherem (S. 135) lautet die Grundformel für den Transformator: $E_p = EMK = 4{\cdot}44\ Z_p\ N \sim 10^{-8}$. Führen wir für N den Wert $B\ Q$ ein, so folgt:

$$E_p = 4{\cdot}44\ Z_p\ B\ Q \sim 10^{-8} \text{ in Volt} \quad . \quad . \quad . \quad V \text{ oder}$$

$$Z_p = \frac{10^8\ E_p}{4{\cdot}44\ B\ Q \sim} \text{ in Windungen} \quad . \quad . \quad . \quad V_1 \text{ und}$$

$$B = \frac{10^8\ E_p}{4{\cdot}44\ Z_p\ Q \sim} \text{ in Kraftlinien für } 1\ cm^2 \quad . \quad . \quad . \quad V_2.$$

Beim Dreiphasentransformator übergeht E_p in $\frac{E_p}{\sqrt{3}}$, so daß:

$$B = \frac{10^8\ E_p}{4{\cdot}44\ \sqrt{3}\ Z_p\ Q \sim} \text{ in Kraftlinien für } 1\ cm^2 \quad . \quad . \quad . \quad V_3,$$

worin $4{\cdot}44\ \sqrt{3} = 7{\cdot}69$.

Nach obigem (§ 170) ist das Verhältnis der primären zu den sekundären Windungen gleich dem Verhältnis der primären zur sekundären Spannung. Da wir Z_p primäre Windungen haben, so muß die Anzahl der sekundären Windungen $= \frac{E_s\ Z_p}{E_p}$ sein. Berücksichtigen wir die Streuung (abhängig von der Induktion und den geometrischen Abmessungen) und die Ohmschen Verluste, so sind die sekundären Windungen:

$$Z_s = K\ \frac{E_s\ Z_p}{E_p} \text{ in Windungen} \quad . \quad . \quad . \quad VI,$$

worin $K = 1{\cdot}025$ ein erfahrungsgemäßer Koeffizient ist.

Aus dem Jouleschen Gesetze folgen die Kupferverluste in Watt. und zwar für Einphasenstrom:

$$P_{k\,p} = J_p^2\ .\ W_p \text{ in Watt} \quad . \quad . \quad . \quad VII \text{ und}$$

$$P_{k\,s} = J_s^2\ .\ W_s \text{ in Watt} \quad . \quad . \quad . \quad VII_1,$$

für Dreiphasenstrom:

$$P_{k\,p} = 3\ J_p^2\ W_p \text{ in Watt} \quad . \quad . \quad . \quad VIII \text{ und}$$

$$P_{k\,s} = 3\ J_s^2\ W_s \text{ in Watt} \quad . \quad . \quad . \quad VIII_1.$$

Die primäre Stromstärke $J_p = \frac{V\ A}{h\ E_p}$ in Ampère . . . IX.

Die sekundäre Stromstärke $J_s = \frac{V\ A}{E_s}$ in Ampère . . . X.

Es ist ohneweiters klar, daß $W_p = \frac{J_p^2\ W_p}{J_p^2}$ in Ohm . . . XI und

$$W_s = \frac{J_s^2\ W_s}{J_s^2} \text{ in Ohm} \quad . \quad . \quad . \quad XII.$$

Für den Querschnitt Q in Quadratmillimetern fanden wir (I. T., 1. B, S. 17): $Q = C \cdot \frac{L}{W}$, worin C = spezifischer Widerstand, L = Länge in Metern und W = Widerstand in Ohm. Führen wir anstatt C den Wert $\frac{1}{C} = \gamma$ = Leitungsfähigkeit, anstatt L dagegen λZ_p, anstatt W schließlich W_p ein, so erhalten wir:

$$Q_p = \frac{\lambda Z_p}{\gamma W_p} \text{ in Quadratmillimetern} \quad . \quad . \quad . \quad XIII \text{ und}$$

sinngemäß $Q_s = \frac{\lambda Z_p}{\gamma W_s}$ in Quadratmillimetern . . . XIV oder

$$W_p = \frac{\lambda Z_p}{\gamma Q_p} \text{ in Ohm} \quad . \quad . \quad . \quad XV \text{ und}$$

$$W_s = \frac{\lambda Z_s}{\gamma Q_s} \text{ in Ohm} \quad . \quad . \quad . \quad XVI.$$

Mit Bezug auf Formel VII finden wir:

$$P_{k\,p} = J_p^2 \frac{\lambda Z_p}{\gamma Q_p} \text{ in Watt} \quad . \quad . \quad . \quad XVII \text{ und}$$

$$P_k = \frac{\lambda}{\gamma} \left(\frac{J_p^2 Z_p}{Q_p} + \frac{J_s^2 Z_s}{Q_s} \right) \text{ in Watt} \quad . \quad . \quad . \quad XVIII.$$

181. Berechnung eines Einphasentransformators (Manteltype, Fig. 261) **der Österreichischen Schuckert-Werke**, Fig. 237 bis 239. Bezeichnungen nach § 179. Formeln nach § 180.

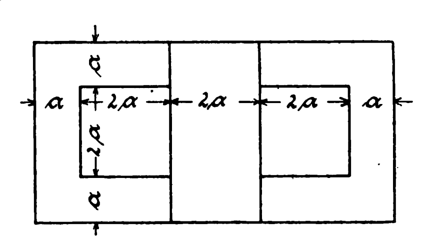


Fig. 237. Manteltransformator. Blechfläche.

Leistung $P = 5\,KVA$, primäre Spannung $E_p = 2000$ Volt, sekundäre Spannung $E_s = 110$ Volt, Perioden $\sim = 50$.

Annahmen: $a = 5\,cm$, $\triangle = 0{\cdot}2\,mm$, $\delta = 0{\cdot}04\,mm$, $\eta = 0{\cdot}002$, $B = 6000$.

$$P_h = 2{\cdot}7\% = 135 \text{ Watt}$$
$$P_k = 1{\cdot}7\% = 85 \text{ „}$$
$$P_w = 0{\cdot}3\% = 15 \text{ „}$$
$$P_h + P_k + P_w = 4{\cdot}7\% = 235 \text{ Watt}$$
$$h = 95{\cdot}3\%.$$

1. Volumen. Nach § 180 ist:

$$V_e = \frac{10^7 P_h}{\eta B^{1\cdot 6} \sim} \quad . \quad . \quad . \quad I$$

$$= \frac{10^7 \,.\, 135}{0\cdot 002 \,.\, 6000^{1\cdot 6} \,.\, 50} = 12170 \; cm^3.$$

2. Blechfläche. Nach Fig. 237 ist die Blechfläche

$$S_b = 24 \, a^2 = 24 \,.\, 25 = 600 \; cm^2.$$

3. Höhe des Blechpaketes einschließlich Papier.

$$H_b = \frac{V_e \,.\, (\Delta + \delta)}{S_b \,.\, \Delta} \quad . \quad . \quad . \quad II$$

$$= \frac{12170 \,.\, (0\cdot 2 + 0\cdot 04)}{600 \,.\, 0\cdot 2} = 24\cdot 34 \; cm.$$

Wir führen den Transformator mit $H_b = 20 \; cm$ aus.

4. Eisenquerschnitt.

$$Q_e = 2 \, a \, b \frac{\Delta}{\Delta + \delta} \quad . \quad . \quad . \quad III.$$

$$= 2 \,.\, 5 \,.\, 24 \,.\, \frac{0\cdot 2}{0\cdot 2 + 0\cdot 04} = 200 \; cm^2.$$

5. Wirbelstromverlust.

$$P_w = \left(\frac{\Delta \,.\, B \,.\, \sim}{10^6 \,.\, K}\right)^2 . \, V_e \quad . \quad . \quad . \quad IV,$$

worin K ein für die Manteltype geltender erfahrungsgemäßer Koeffizient ist.

$$P_w = \left(\frac{0\cdot 2 \,.\, 6000 \,.\, 50}{10^6 \,.\, 2\cdot 5}\right)^2 . \, 12000 = 7 \text{ Watt},$$

wenn $V_e = F_b \,.\, H_b = 600 \,.\, 20 = 12000 \; cm^3$.

6. Primäre Windungszahl.

$$Z_p = \frac{10^8 \,.\, E_p}{4\cdot 44 \,.\, N \,.\, \sim} \quad . \quad . \quad . \quad V,$$

worin $N = B \,.\, Q_e$ (§ 180).

$$Z_p = \frac{10^8 \,.\, 2000}{4\cdot 44 \,.\, 6000 \,.\, 200 \,.\, 50} = 750 \text{ Windungen}.$$

7. Sekundäre Windungszahl. Unter Berücksichtigung der Streuung und der Ohmschen Verluste ergibt sich die sekundäre Windungszahl:

$$Z_s = K \frac{E_s}{E_p} Z_p \quad . \quad . \quad . \quad VI.$$

$$= 1\cdot 025 \,.\, \frac{110}{2000} \,.\, 750 = 42\cdot 28.$$

Wir nehmen daher $Z_s = 42$. Die primäre Windungszahl Z_p ist nach 6. gleich 750. Mit Bezug auf $Z_s = 42$ stellen wir nun die primären Windungen Z_p richtig.

Die richtige primäre Windungszahl ergibt sich aus der Proportion

$$750 : 1{\cdot}025 \; \frac{110 \, . \, 750}{2000} = Z_p : 42.$$

Daraus folgt $Z_p = 745$ Windungen.

8. Mittlere Windungslänge. Fig. 238 stellt einen senkrechten Schnitt durch die Figur 237 dar. Die linke Schnittfläche der Figur 238 bezeichnet den Schnitt durch den Mantel, die rechte Schnittfläche dagegen den Schnitt durch den eigentlichen Kern des Transformators. Fig. 238 zeigt die Deckscheibe in Ansicht. Wie aus den

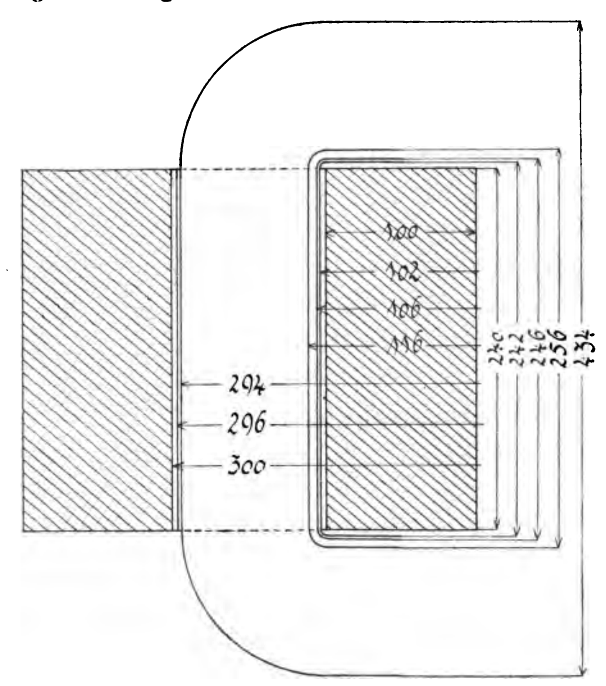


Fig. 238. Manteltransformator. Mittlere Windungslänge.

Abmessungen der Figur ersichtlich ist, umgibt den Eisenkern zunächst eine 1 *mm* dicke Luftschicht, dann eine 2 *mm* dicke Preßspanhülse und eine 5 *mm* dicke Preßspanspule, auf welche die Windungen aufgewickelt sind.

a) Vier Bogen in den vier Ecken des Bordes.

Halbmesser im Bogen der Bordscheibe $= 2\,r$.

Halbmesser im Bogen der mittleren Windung $= r$.

294 *mm* Breite der Bordscheibe außen.

116 *mm* Breite der Bordscheibe innen.

178 *mm* doppelte Bordbreite $= 4\,r$.

$2r = 178 : 2 = 89$ *mm* einfache Bordbreite = Halbmesser im Bogen der Bordscheibe. Daher ist $\frac{2\pi r}{4}$ = einem Bogen in einer Ecke des Bordes und $2r\pi = 89\pi = 280$ *mm* vier Bogen in den vier Ecken des Bordes.

b) Doppelte Länge der Bordscheibe innen = 2 . 256 = = 512 *mm*.

c) Doppelte Breite der Bordscheibe innen = 2 . 116 = = 232 *mm*.

d) Die mittlere Windungslänge setzt sich aus den Punkten *a*, *b*, *c* zusammen. Wir erhalten somit:

a) Vier Bogen in den vier Ecken des Bordes	=	280 *mm*
b) Doppelte Länge der Bordscheibe innen	=	512 *mm*
c) Doppelte Breite der Bordscheibe innen	=	232 *mm*
λ	=	1024 *mm*

= 1·024 *m*.

9. Kupferverlust primär. Verteilen wir die Verluste gleichmäßig auf die beiden Wicklungen, so folgt:

$$P_{kp} = J_p^2 \,.\, W_p \quad . \; . \; . \quad VII.$$
$$= 42{\cdot}5 \text{ Watt.}$$

10. Kupferverlust sekundär.

$$P_{ks} = J_s^2 \,.\, W_s \quad . \; . \; . \quad VIII.$$
$$= 42{\cdot}5 \text{ Watt.}$$

11. Primärer Strom. Nehmen wir den Wirkungsgrad mit 0·953 an, so ergibt sich:

$$J_p = \frac{V \,.\, A}{h \,.\, E_p} \quad . \; . \; . \quad IX.$$
$$= \frac{5000}{0{\cdot}953 \,.\, 2000} = 2{\cdot}63 \text{ Ampère.}$$

12. Sekundärer Strom.

$$J_s = \frac{V\,A}{E_s} \quad . \; . \; . \quad X.$$
$$= \frac{5000}{110} = 45{\cdot}5 \text{ Ampère.}$$

13. Primärer Widerstand.

$$W_p = \frac{J_p^2 \,.\, W_p}{J_p^2} \quad . \; . \; . \quad XI.$$
$$= \frac{42{\cdot}5}{2{\cdot}63^2} = 6{\cdot}144 \text{ Ohm.}$$

14. Sekundärer Widerstand.

$$W_s = \frac{J_s^2\ W_s}{J_s^2} \quad . \ . \ . \quad XII.$$

$$= \frac{42{\cdot}5}{45{\cdot}5^2} = 0{\cdot}02053 \text{ Ohm.}$$

15. Primärer Drahtquerschnitt.

$$Q_p = \frac{\lambda \,.\, Z_p}{\gamma \,.\, W_p} \quad . \ . \ . \quad XIII.$$

$$= \frac{1{\cdot}024 \,.\, 750}{55 \,.\, 6{\cdot}144} = 2{\cdot}27\ mm^2 \text{ oder } 1{\cdot}7\ mm \text{ Durchmesser.}$$

16. Sekundärer Drahtquerschnitt.

$$Q_s = \frac{\lambda\ Z_s}{\gamma\ W_s} \quad . \ . \ . \quad XIV.$$

$$= \frac{1{\cdot}024 \,.\, 42}{55 \,.\, 0{\cdot}0205} = 38{\cdot}09\ mm^2.$$

182. Nachrechnung des im letzten Paragraphen berechneten Transformators. Nachdem zuletzt alle Größen festgelegt wurden, können wir zur Nachrechnung übergehen.

1. Magnetische Induktion.

$$B = \frac{E_p \,.\, 10^8}{4{\cdot}44\ Z\ Q \sim} \quad . \ . \ . \ . \ . \quad V.$$

$$= \frac{2000 \,.\, 10^8}{4{\cdot}44 \,.\, 745 \,.\, 200 \,.\, 50} = 6050.$$

2. Wattverlust durch Hysteresis.

$$P_h = \frac{\eta\ B^{1{\cdot}6} \sim V_e}{10^7} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad I.$$

$$= \frac{0{\cdot}002 \,.\, 6050^{1{\cdot}6} \,.\, 50 \,.\, 12000}{10^7} = 135 \text{ Watt.}$$

3. Wirbelstromverluste.

$$P_w = \left(\frac{\Delta\ B \sim}{10^6\ K}\right)^2 V_e \quad . \ . \ . \quad IV.$$

Für die Manteltype gilt der erfahrungsgemäße Koeffizient $K = 2{\cdot}5$. Somit erhalten wir:

$$P_w = \left(\frac{0{\cdot}2 \,.\, 6050 \,.\, 50}{10^6 \,.\, 2{\cdot}5}\right)^2 12000 = 7 \text{ Watt,}$$

das sind $0{\cdot}14\%$.

4. Stromstärke primär.

$$J_p = \frac{V \,.\, A}{h \,.\, E_p} \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \quad IX.$$

$$= \frac{5000}{0{\cdot}9546 \,.\, 2000} = 2{\cdot}62 \text{ Ampère.}$$

5. Stromstärke sekundär.

$$J_s = \frac{V\,A}{E_s} \quad . \quad . \quad . \quad X.$$

$$= \frac{5000}{110} = 45{\cdot}5 \text{ Ampère.}$$

6. Widerstand primär.

$$W_p = \frac{\lambda\, Z_p}{\gamma\, Q_p} \quad . \quad . \quad . \quad XV.$$

$$= \frac{1{\cdot}024\,.\,745}{55\,.\,2{\cdot}28} = 6{\cdot}084 \text{ Ohm.}$$

7. Widerstand sekundär.

$$W_s = \frac{\lambda\, Z_s}{\gamma\, Q_s}$$

$$= \frac{1{\cdot}024\,.\,42}{55\,.\,38{\cdot}5} = 0{\cdot}0203 \text{ Ohm.}$$

8. Primärer Kupferverlust.

$$P_{kp} = J_p^2\,.\,W_p \quad . \quad . \quad . \quad VII.$$

$$= 2{\cdot}62^2\,.\,6{\cdot}084 = 42 \text{ Watt.}$$

9. Sekundärer Kupferverlust.

$$P_{ks} = J_s^2\,.\,W_s \quad . \quad . \quad . \quad VIII.$$

$$= 45{\cdot}5^2\,.\,0{\cdot}0203 = 42 \text{ Watt}$$

10. Primäre und sekundäre Kupferverluste.

$$P_{kp} + P_{ks} = 42 + 42 = 84 \text{ Watt,}$$

das sind 1·68%.

183. Anordnung der Wicklung des zuletzt berechneten Transformators.

1. Anordnung der primären Wicklung.

Spule 1, Fig. 239, 372 Windungen.

Spule 6, Fig. 239, 373 Windungen.

Spule 1 hat 33 Lagen à 11 Windungen } zusammen 372
1 Lage à 9 Windungen } Windungen.

Spule 6 hat 33 Lagen à 11 Windungen } zusammen 373
1 Lage à 10 Windungen } Windungen.

Draht blank 1·7 *mm* Durchmesser, isoliert 2 *mm* Durchmesser.

2. Anordnung der sekundären Wicklung. Die sekundäre Wicklung besteht aus den Doppelspulen 2, 3 und 4, 5. Auf jeder einzelnen Spule sind Kupferbänder aufgewickelt. Die Wicklung wird so durchgeführt, daß man die zwei einzelnen Spulen der Doppelspule gleichzeitig wickelt. Zwischen den einzelnen Spulen, z. B. zwischen 2 und 3, befindet sich Preßspan.

Zwei Spulen à 11 Windungen à 11 Lagen à 1 Windung.
Zwei Spulen à 10 Windungen à 10 Lagen à 1 Windung.
Kupferband 5·5 . 7 mit Band isoliert.

3. Schaltung der Spulen. Spule 1 und 6 hintereinander. Spule 2, 3 und 4, 5 hintereinander.

184. Berechnung eines Dreiphasentransformators (Manteltype Fig. 262) **der Österreichischen Schuckert-Werke.** (Fig. 240 bis 243.) Bezeichnungen nach § 179. Formeln nach § 180.

Leistung $P = 5\ KVA$, primäre Spannung $E_p = 1900$ Volt, sekundäre Spannung $E_s = 125$ Volt, Perioden $\sim = 50$.

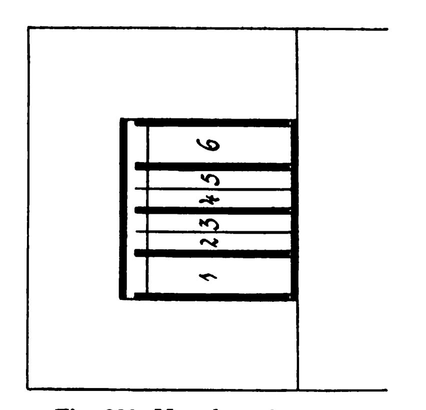


Fig. 239. Manteltransformator. Anordnung der Wicklung.

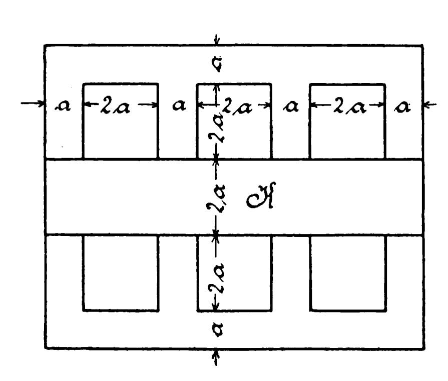


Fig. 240. Dreiphasen-Manteltransformator. Blechfläche.

Annahmen: $a = 40\,mm$, $\triangle = 0{\cdot}2\ mm$, $\delta = 0{\cdot}04\ mm$, $\eta = 0{\cdot}002$, $B = 6000$.

$$\begin{aligned} P_h &= 3{\cdot}1\% = 155 \text{ Watt} \\ P_k &= 2{\cdot}2\% = 110 \text{ Watt} \\ P_w &= 0{\cdot}2\% = 10 \text{ Watt} \\ \hline P_h + P_k + P_w &= 5{\cdot}5\% = 275 \text{ Watt} \\ h &= 94{\cdot}5\%. \end{aligned}$$

1. Volumen. $V_e = \dfrac{10^7\, P_h}{\eta\, B^{1\cdot 6} \sim}$ . . . . . *I.*

$$V_e = \frac{10^7 \,.\, 155}{0{\cdot}002 \,.\, 6000^{1\cdot 6} \,.\, 50} = 14000\, cm^3.$$

2. Blechfläche. Aus Fig. 240 finden wir die Blechfläche.

$$S_b = 56\, a^2 = 56 \,.\, 4^2 = 896\, cm^2.$$

3. Höhe des Blechpaketes einschließlich Papierzwischenlage.

$$H_b = \frac{V_e (\Delta + \delta)}{S_b \Delta} \quad . \quad . \quad . \quad II.$$

$$H_b = \frac{14000 \ (0{\cdot}2 + 0{\cdot}04)}{896 \ . \ 0{\cdot}2} = 18{\cdot}7 \ cm.$$

Wir wählen endgültig $H_b = 185 \ mm$.

4. Eisenquerschnitt.

$$Q_e = 2 \, a \, b \frac{\Delta}{\Delta + \delta} \quad . \quad . \quad . \quad III.$$

$$Q_e = 2 \ . \ 4 \ . \ 18{\cdot}5 \ \frac{0{\cdot}2}{0{\cdot}2 + 0{\cdot}04} = 124 \ cm^2.$$

5. Wirbelstromverlust.

$$P_w = \left(\frac{\Delta \ B \sim}{10^6 \ K}\right)^2 V_e \quad . \quad . \quad . \quad IV.$$

$$P_w = \left(\frac{0{\cdot}2 \ . \ 6000 \ . \ 50}{10^6 \ . \ 2{\cdot}5}\right)^2 14000 = 8 \ \text{Watt}.$$

6. Primäre Windungszahl.

$$Z_p = \frac{10^8 \ E_p}{4{\cdot}44 \ B \ Q_e \sim} \quad . \quad . \quad . \quad V.$$

$$Z_p = \frac{10^8 \ . \ \frac{1900}{\sqrt{3}}}{4{\cdot}44 \ . \ 6000 \ . \ 124} = 664 \ \text{Windungen}.$$

7. Sekundäre Windungszahl. Berücksichtigen wir die Streuung und die Ohmschen Verluste, so gilt die Formel

$$Z_s = K \frac{E_s}{E_p} Z_p \quad . \quad . \quad . \quad VI.$$

8. Mittlere Windungslänge, Fig. 241. Der Kern ist 80 *mm* breit und 185 *mm* hoch. Derselbe wird beiderseits durch zwei Deckplatten aus Bronze von 6 *mm* Stärke vermittels isolierter Bolzen zusammengehalten. Es erhöht sich somit die Höhe des Kernes auf 185 + 12 = 197 *mm*. Über den Kern sind Pappspulen geschoben, auf welchen die Windungen aufgewickelt werden. Die Pappspule ist 5 *mm* stark und hat rund herum 1 *mm* Luft; sie besitzt demnach außen folgende Abmessungen:

Äußerer Umfang in der einen Abmessung 80 + 2 + 2 . 5 = 92 *mm*.
Äußerer Umfang in der anderen Abmessung

185 + 12 + 2 . 5 = 209 *mm*.

Der Rahmen, auf welchen die Spule gewickelt wird, ist behufs leichten Aufbringens der Spule auf die Papphülse um 4 *mm* größer und hat daher die Abmessungen (92 + 4) (209 + 4) = 96 . 213 *mm* (Fig. 241).

So wie im letzten Paragraphen erhalten wir nun die mittlere Windungslänge.

a) Vier Bogen in den vier Ecken des Bordes $= 72 \,.\, \pi = 226\ mm$
b) doppelte Länge der Bordscheibe innen $= 213 \,.\, 2 = 426\ mm$
c) doppelte Breite der Bordscheibe innen $= 96 \,.\, 2 = 192\ mm$
Die mittlere Windungslänge $\lambda = 844\ mm.$

9. Primärer Strom.

$$J_p = \frac{V\,A}{h\,.\,E_p} \quad . \; . \; . \quad IX.$$

$$J_p = \frac{5000}{0{\cdot}945\,.\,1900\,.\,\sqrt{3}} = 1{\cdot}61 \text{ Ampère.}$$

10. Sekundärer Strom.

$$J_s = \frac{V\,A}{E_s} \quad . \; . \; . \quad X.$$

$$J_s = \frac{5000}{125\,\sqrt{3}} = 23 \text{ Ampère.}$$

11. Primärer Drahtquerschnitt. Der Kupferverlust P_k wurde mit 110 Watt angenommen. Verteilen wir denselben gleichmäßig auf die beiden Wicklungen, so erhalten wir $P_{kp} = P_{ks} = 55$ Watt.

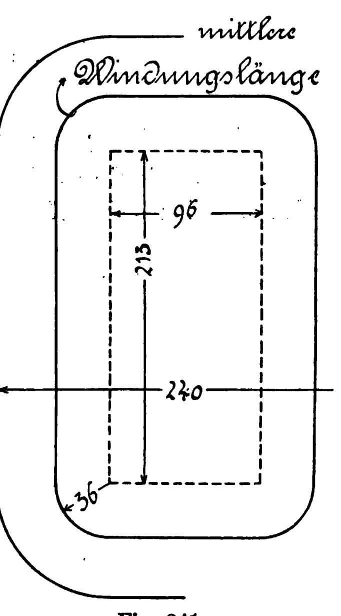


Fig. 241.
Dreiphasen-Manteltransformator.
Mittlere Windungslänge.

$$Q_p = J_p^2 \,.\, \frac{\lambda\,Z_p}{\gamma\,P_k} \quad . \; . \; . \quad XVII.$$

$Q_p = 1{\cdot}61^2 \dfrac{3\,.\,0{\cdot}844\,.\,664}{55\,.\,55} = 1{\cdot}44\ mm^2$. Wir wählen einen Draht von $1{\cdot}33\ mm^2$ oder $1{\cdot}3\ mm$ Durchmesser, isoliert $1{\cdot}5\ mm$ Durchmesser.

11. Sekundärer Drahtquerschnitt.

$$Q_s = J_s^2 \,.\, \frac{\lambda\,Z_s}{\gamma\,.\,P_k} \quad . \; . \; . \quad XVII.$$

$$Q_s = \frac{23^2\ 3\,.\,0{\cdot}844\,.\,45}{55\,.\,55} = 20\,mm^2.$$

Wir wählen Kupferband von den Abmessungen $12.1{\cdot}7\ mm = 20{\cdot}4\ mm^2$.

13. Kupferverluste.

$$P_k = \left(\frac{\lambda}{\gamma}\,\frac{J_p^2\,Z_p}{Q_p} + \frac{J_s^2\,Z_s}{Q_s}\right) \quad . \; . \; . \quad XVIII.$$

$$P_k = \frac{3\,.\,0{\cdot}844}{55}\left(\frac{664}{1{\cdot}33}\,1{\cdot}61^2 + \frac{45}{20{\cdot}4}\,23^2\right) = 118 \text{ Watt.}$$

Da wir jedoch 110 Watt angenommen haben, so vergrößern wir den sekundären Querschnitt und nehmen endgültig $12 \times 1 \cdot 8 = 21 \cdot 6$ *mm*², dann ergeben sich 110 Watt Kupferverlust.

14. Beanspruchung im Kupfer.

$$\frac{J_p}{Q_p} = \frac{1 \cdot 61}{1 \cdot 33} = 1 \cdot 22 \text{ Ampère},$$

$$\frac{J_s}{Q_s} = \frac{23}{21 \cdot 6} = 1 \cdot 15 \text{ Ampère}.$$

185. Wicklung des zuletzt berechneten Transformators.

1. Die mittlere Phase ist verkehrt gewickelt. Die drei Spulen befinden sich auf dem mittleren Kern. Die mittlere Spule ist in

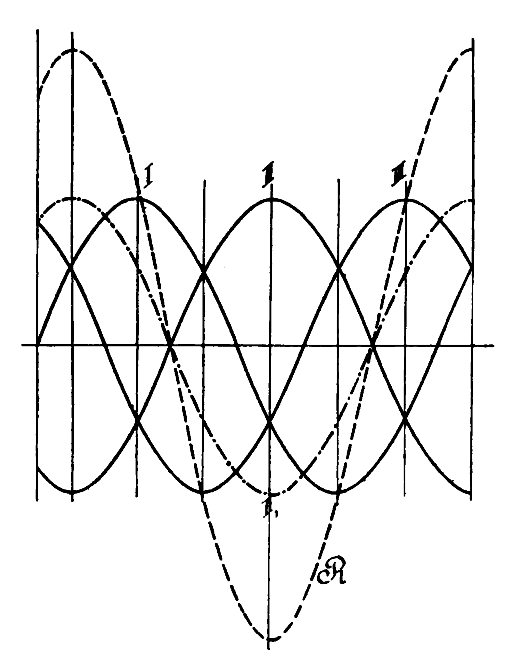


Fig. 242. Dreiphasen-Manteltransformator. Die mittlere Phase ist verkehrt gewickelt.

ihrer Wicklungsrichtung den beiden äußeren aus dem folgenden Grunde verkehrt gewickelt. Würden alle drei Phasen im gleichen Sinne gewickelt, so wäre die Resultierende gleich Null. Durch Umkehren der mittleren aber entsteht, wie aus Fig. 242 ersichtlich ist, eine Welle von doppelter Amplitude.

Das resultierende magnetische Feld hat dieselbe Phasenverschiebung wie die mittlere Phase, aber eine doppelt so große Amplitude.

2. Anordnung der Wicklung. Die Wicklung ist so angeordnet, daß je die beiden äußeren Spulen 1 und 4, Fig. 243, die primären und die beiden inneren 2 und 3 die sekundären sind.

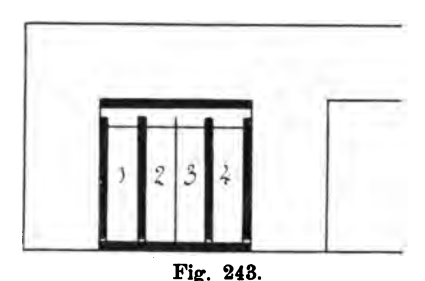


Fig. 243.
Dreiphasen-Manteltransformator.
Anordnung der Wicklung.

3. Primäre Wicklung. 3 . 664 Windungen, 3 . 2 Spulen à 332 Windungen.

36 Lagen à 9 Windungen = 324 Windungen
1 Lage à 8 Windungen = 8 Windungen
Anzahl der primären Windungen = 332 Windungen.

4. Sekundäre Wicklung. 3 . 45 Windungen,
3 . 1 . 22 Windungen à 22 Lagen à 1 Windung,
3 . 1 . 23 Windungen à 23 Lagen à 1 Windung.

186. Nachrechnung eines Einphasentransformators (Kerntype, Fig. 282) von **Ganz & Co.**,[1]) Fig. 244 bis 248. Bezeichnungen nach § 179. Formeln nach § 180.

Leistung $P = 300\ KVA$, primäre Spannung $E_p = 5000$ Volt, sekundäre Spannung $E_s = 430$ Volt, Perioden $\sim = 25$.

Annahmen. $\triangle = 0{\cdot}2\ mm$, $\delta = 0{\cdot}04\ mm$, $h = 98{\cdot}3\,\%$, $K = 1{\cdot}02$, $j_p = 1{\cdot}02$ Ampère.

[1]) Nachgerechnet nach den Angaben von Ganz & Co., Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, S. 44.

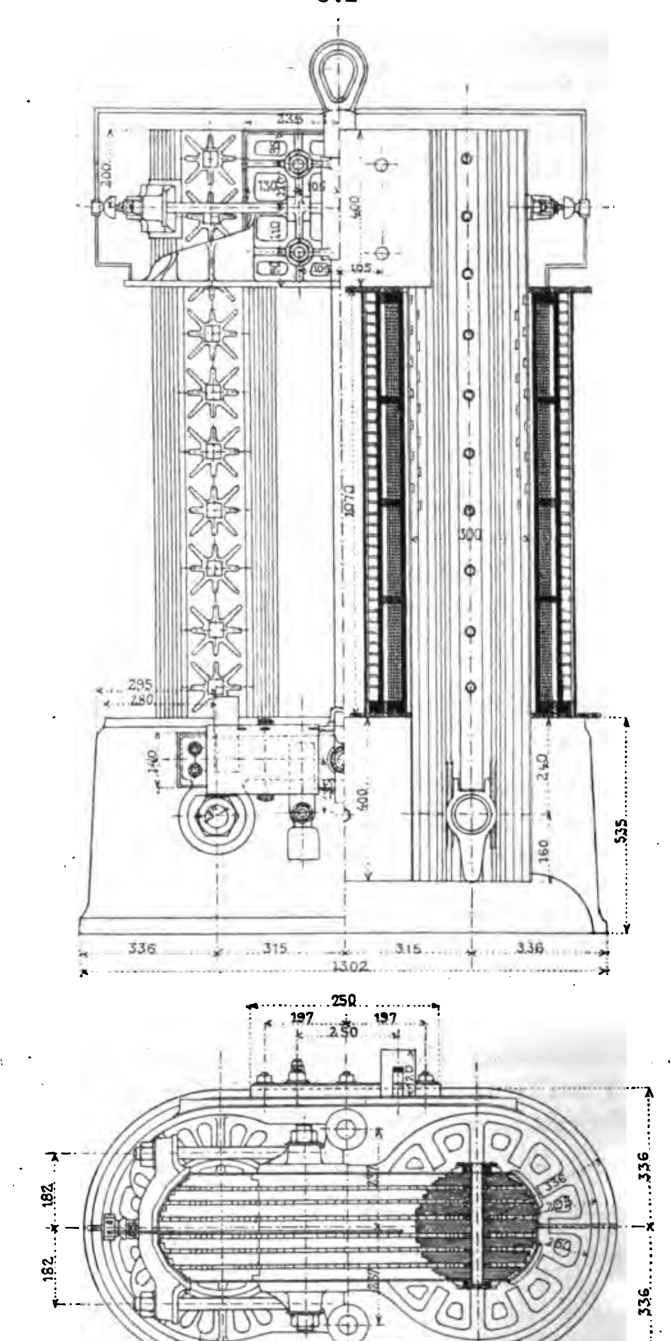


Fig. 244. Kerntransformator von Ganz & Co.

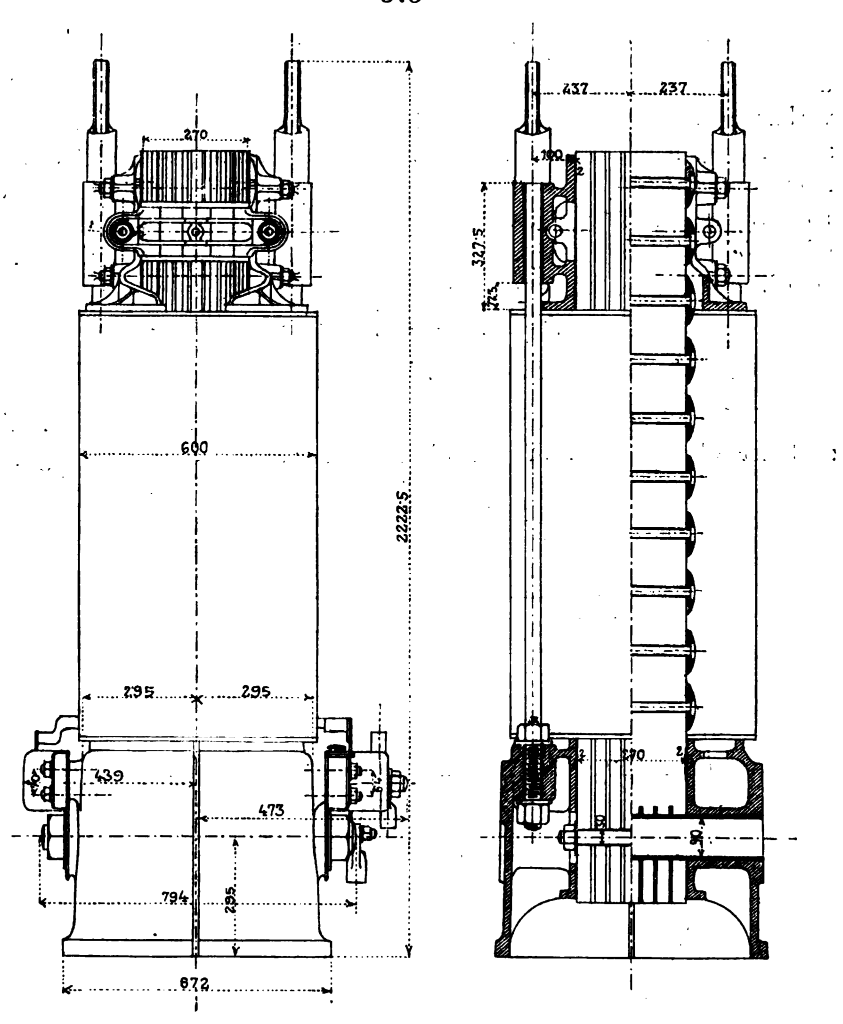


Fig. 245. Kerntransformator von Ganz & Co.

1. Primäre Stromstärke.

$$J_p = \frac{V A}{h\, E_p} \quad . \; . \; . \quad IX.$$

$$J_p = \frac{300000}{0{\cdot}983 \,.\, 5000} = 61 \text{ Ampère.}$$

2. Sekundäre Stromstärke.

$$J_s = \frac{V A}{h\, E_s} \quad . \; . \; . \quad X.$$

$$J_s = \frac{300000}{430} = 697{\cdot}5 \text{ Ampère.}$$

3. Fläche, Fig. 244 bis 247. Kern: Aus Fig. 244 (Grundriß) und aus Fig. 246 ist es ersichtlich, daß im ganzen sieben Blechpakete vorhanden sind. Das mittlere hat eine Breite 300 *mm* = 30 *cm*, die zwei nächsten haben eine mittlere Breite von 27 *cm* (folgt aus den Abmessungen), die zwei nächsten von 25 *cm* und die zwei letzten von 18 *cm*. Daher Länge der Blechpakete = (18 + 25 + 27) 2 + 30. Die Dicke jedes Blechpaketes beträgt 30 *mm* = 3 *cm*, Fig. 246. Damit ergibt sich die Fläche des Kernes:

$$[(18 + 25 + 27)\,2 + 30]\,3 = 510\ cm^2.$$

$$Q_k = 510\,\frac{20}{24} = 425\ cm^2 \text{ wirklicher Kerneisenquerschnitt.}$$

Joch: Dicke des Blechpaketes = 30 *mm* = 3 *cm*, Fig. 246. Anzahl der Blechpakete = 7 und die Höhe des Joches = 40 *cm*, Fig. 247.

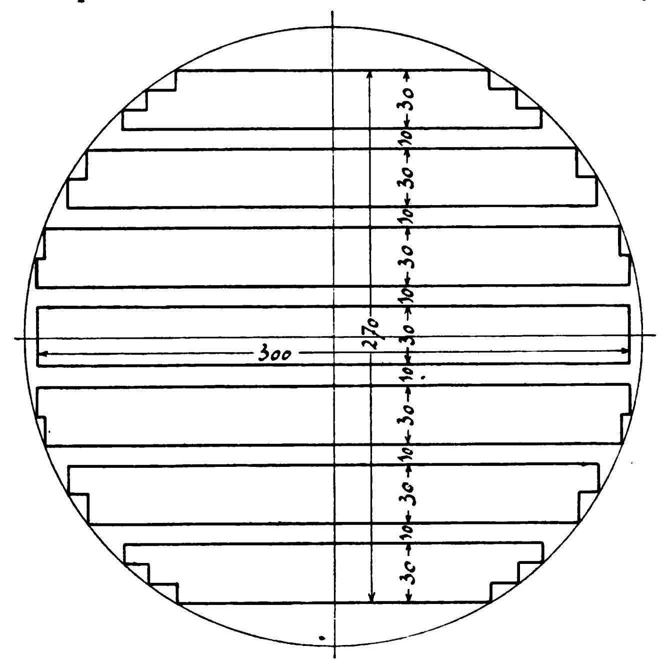


Fig. 246. Kerntransformator.
Kern. 7 Blechpakete à 30 *mm*. Luft 10 *mm*.

Daraus folgt: $Q_j = 3\,.\,7\,.\,40\,.\,\frac{20}{24} = 700\ cm^2$ wirklicher Jocheisenquerschnitt.

4. Volumen. Kerne: Anzahl der Kerne: 2, Jochabstand = = 1070 *mm* = 107 *cm*, Fig. 247, $Q_k = 425\ cm^2$, daher:

$$V_k = 2\,.\,107\,.\,425 = 90950\ cm^3.$$

Joche: Anzahl der Joche: 2, Breite des Blechpaketes 30 *mm* = = 3 *cm*, Fig. 246, Höhe des Joches = 400 *mm* = 40 *cm*, Fig. 247, und Mitte bis Mitte Joch = 630 *mm* = 63 *cm*, Fig. 247. Für die mittleren Breiten der Blechpakete haben wir oben unter 3. beim Kern gefunden: 18, 25, 27 und 30 *cm*.

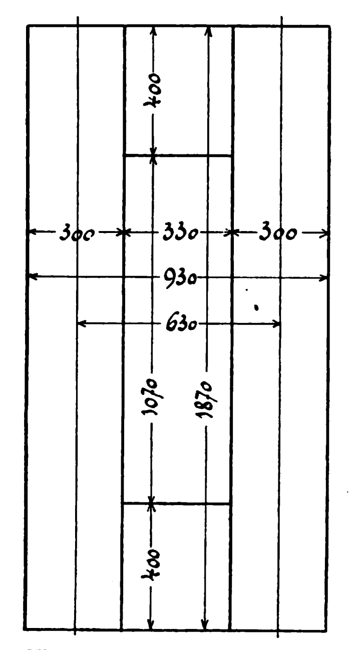


Fig. 247. Kerntransformator. Fläche.

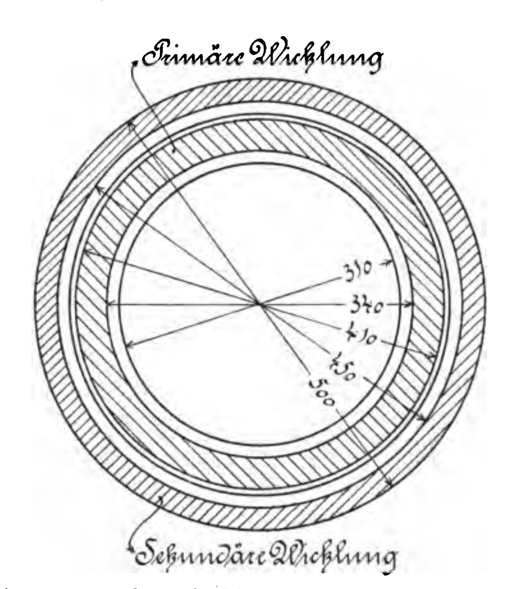


Fig. 248. Kerntransformator. Wicklung.

Länge des kürzesten Blechpaketes = 63 + 18 = 81 *cm*,
Länge des nächsten Blechpaketes = 63 + 25 = 88 *cm*,
Länge des folgenden Blechpaketes = 63 + 27 = 90 *cm*,
Länge des mittleren Blechpaketes = 63 + 30 = 93 *cm*.
Die Länge sämtlicher Blechpakete beträgt demnach:

$$(81 + 88 + 90)\,2 + 93 \text{ und}$$

$$V_j = 2\,.\,3\,.\,40\,\{[81 + 88 + 90]\,2 + 93\} = 146640\ cm^3.$$

5. Primäre Windungen. Die primäre Stromstärke J_p beträgt 61 Ampère, die Beanspruchung $j_p = 1{\cdot}02$. Daraus und aus den Abmessungen der Kerne ergeben sich etwa 880 Windungen von etwa 60 mm^2.

6. Sekundäre Windungen.

$$Z_s = K \frac{E_s}{E_p}\,.\,Z_p \quad . \quad . \quad . \quad VI.$$

Nach Annahme ist $K = 1{\cdot}02$, so daß

$$Z_s = 1{\cdot}02 \cdot \frac{430}{5000} \cdot 800 = 77 \text{ Windungen.}$$

7. Magnetische Induktion im Kern.

$$B_k = \frac{10^8 E_p}{4{\cdot}44\, Z_p\, Q_k \sim} = \frac{10^8 \cdot 5000}{4{\cdot}44 \cdot 880 \cdot 425 \cdot 25} = 1200 \text{ Kraft-}$$

linien für 1 cm^2.

8. Magnetische Induktion im Joch. Für die Induktion im Kern nahmen wir 1200 an. Die Induktion im Joch wird deshalb im Verhältnisse der Querschnitte kleiner werden, d. h.:

$$B_j = 1200 \cdot \frac{425}{700} = 725.$$

9. Primäre Wicklung (Fig. 248).

2 . 4 Spulen à 225 *mm* hoch, 5 Lagen à 22 Windungen.

10. Sekundäre Wicklung.

2 . 1 Spule à 1000 *mm* hoch: 1 Lage à 38 Windungen,
1 Lage à 39 Windungen.

11. Sekundärer Drahtquerschnitt. Dividieren wir die Wicklungshöhe 1000 *mm* durch die Anzahl der Windungen, so erhalten wir $\frac{1000}{39} = 25{\cdot}6$ *mm* als eine Abmessung der Kupferstange.

Nach Annahme war $Q_s = 25 \cdot 25\ mm^2$, isoliert $25{\cdot}6 \cdot 25{\cdot}6\ mm^2$.

12. Primärer Drahtquerschnitt. Mit Bezug auf Fig. 248 erhalten wir:

$$\begin{array}{l} 410 \\ 340 \\ \hline 70 : 2 = 35 : 5 = 7 \text{ mm.} \\ 225 : 22 = 10{\cdot}2 \text{ mm.} \end{array}$$

Wir nehmen deshalb $Q = 6{\cdot}3 \cdot 9{\cdot}5\ mm^2$, isoliert $7{\cdot}0 \times 10{\cdot}2$.

13. Primäre Beanspruchung.

$$j_p = 1{\cdot}02 \text{ Ampère für } 1\ mm^2.$$

14. Sekundäre Beanspruchung.

$$j_s = 1{\cdot}11 \text{ Ampère für } 1\ mm^2.$$

15. Verluste durch Hysteresis in Kern und Joch.

$$P_h = \eta \sim 10^{-7} (B_k^{1{\cdot}6}\, V_k + B_j^{1{\cdot}6}\, V_j) \quad \ldots \quad I.$$

$$P_h = 0{\cdot}002 \cdot 25 \cdot 10^{-7} (1200^{1{\cdot}6}\, 90950 + 725^{1{\cdot}6} \cdot 146640).$$

16. Verluste durch Wirbelströme in Kern und Joch.

$$P_w = \left(\frac{\triangle \sim}{10^6\, K}\right)^2 (B_k^2\, V_k + B_j^2\, V_j).$$

$$P_w = \left(\frac{0{\cdot}2 \cdot 25}{10^6 \cdot 2{\cdot}5}\right)^2 (1200^2 \cdot 90950 + 725^2 \cdot 146640) = 0{\cdot}83 \text{ Watt.}$$

Die Verluste durch Wirbelströme sind demnach verschwindend klein.

17. Kupferverluste.

$$P_{k\,p} = J_p{}^2 \cdot \frac{\lambda \cdot Z_p}{\gamma \cdot Q_p} \quad . \quad . \quad . \quad XVII.$$

$$P_{k\,s} = J_s{}^2 \; \frac{\lambda \cdot Z_s}{\gamma\; Q_s} \quad . \quad . \quad . \quad XVII_1.$$

$$P_{k\,p} + J_{k\,s} = 61^2 \; \frac{0{\cdot}375\,\pi\,880}{55 \,.\, 6{\cdot}3 \,.\, 9{\cdot}5} + 697{\cdot}5^2 \; \frac{0{\cdot}475\,\pi\,77}{55 \,.\, 625}.$$

18. Verluste. Übersicht.

Eisenverluste rund	70 Watt
Kupferverluste rund	2790 „
Eisen und Kupferverluste rund	2860 Watt.

187. Nachrechnung eines Dreiphasentransformators (Kerntype, Fig. 265) **der Österreichischen Schuckert-Werke,** Fig. 249 bis 253. Bezeichnungen nach § 179. Formeln nach § 180.

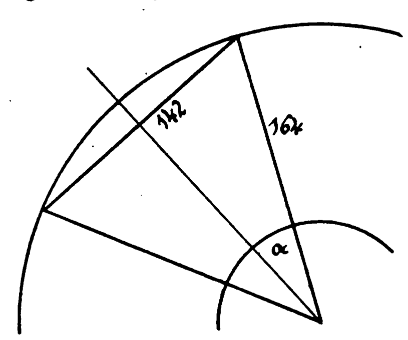


Fig. 249. Dreiphasen-Kerntransformator. Kernvolumenberechnung.

Leistung $P = 42$ KVA, primäre Spannung $E_p = 320$ Volt, sekundäre Spannung $E_s = 120$ Volt

$$J_s = \frac{42000}{120\sqrt{3}} = 222 \text{ Ampère},$$

Perioden $\sim = 50$.

Annahmen: $\triangle = 0{\cdot}2\,mm$, $\delta = 0{\cdot}04\,mm$, $\eta = 0{\cdot}002$. Sternschaltung.

Primär 3 . 2 . 81 Windungen = 486 Windungen.

Nr. I. 3 . 2 Spulen à 11 Windungen à 11 Lagen à 1 Windung $2{\cdot}9 \,.\, 12 = 34{\cdot}8\,mm^2$.

Nr. II. 3 . 14 Spulen à 10 Windungen à 10 Lagen à 1 Windung $2{\cdot}9 \,.\, 12 = 34{\cdot}8\,mm^2$.

Sekundär 3 . 3 . 30 Windungen = 270 Windungen.

Nr. III. 3 . 18 Spulen à 5 Windungen à 5 Lagen à 1 Windung 3·3 . 10 = 66 mm^2, 2 Bänder.

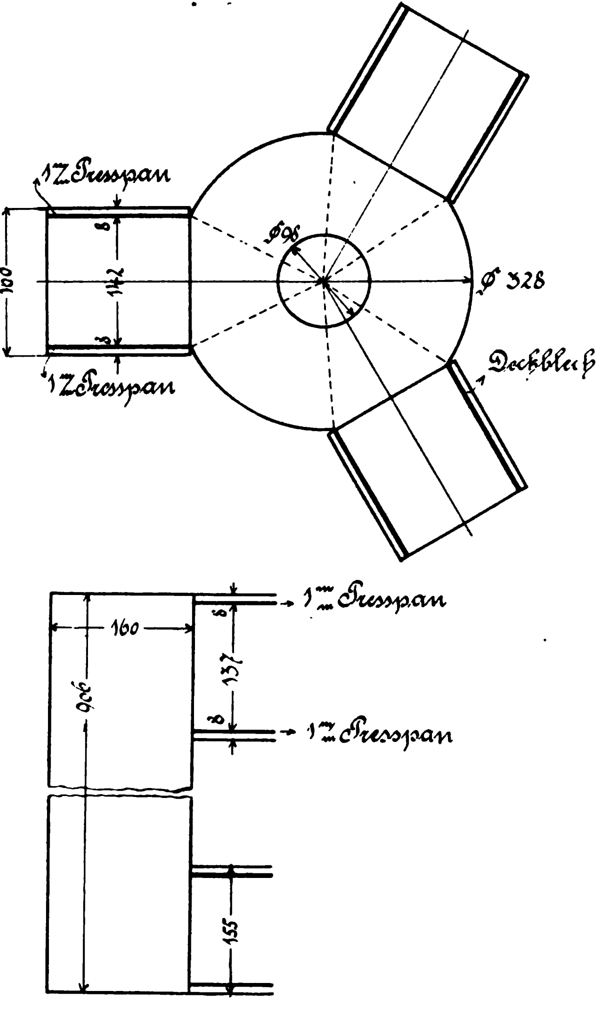


Fig. 250. Dreiphasen-Kerntransformator. Volumenberechnung.

1. Volumen, Fig. 249 und 250.

a) Kernvolumen.

$$\frac{\Delta}{\Delta + \delta} = \frac{0{\cdot}2}{0{\cdot}2 + 0{\cdot}04} = \frac{20}{24}.$$

$$V = 16 \,.\, 90{\cdot}6 \,.\, 14{\cdot}2 \,.\, \frac{20}{24} = 17200 \; cm^3$$

für einen Kern und $3 \times 17200 = 51600 \; cm^3$ für alle drei Kerne.

b) Jochvolumen. Die Jochfläche, Fig. 250, setzt sich aus drei Dreiecken und aus drei Sektoren zusammen.

Höhe eines Dreieckes $= \sqrt{16{\cdot}4^2 - 7{\cdot}1^2} = 14{\cdot}8 \; cm.$

Fläche eines Dreieckes $= \frac{1}{2} \,.\, 14{\cdot}2 \,.\, 14{\cdot}8 = 105 \; cm^2.$

$\alpha = 25^0 \, 39' \, 14''$. Auf drei Sektoren entfallen jedoch

$$360^0 - 6\,\alpha = 206^0 \, 4' \, 36''$$

und der zugehörige Bogen $\varphi = 3{\cdot}59$.

Sektorflächen $= \frac{1}{2} r^2 \varphi = \frac{1}{2} \, 16{\cdot}4^2 \,.\, 3{\cdot}59 = 485 \; cm^2$

drei Dreieckflächen $= 3 \,.\, 105 = 315 \; cm^2$

Zusammen $800 \; cm^2.$

Innerer Kreis $= 4{\cdot}9^2 \pi = 75 \; cm^2$

$725 \; cm^2.$

Jochvolumen $= 725 \,.\, 13{\cdot}7 \,.\, \frac{20}{24} = 8250 \; cm^3$ und

$$2 \times 8250 = 16500 \; cm^3$$

für beide Joche.

2. Querschnitte.

a) Kernquerschnitt. $16 \,.\, 14{\cdot}2 \,.\, \frac{20}{24} = 189 \; cm^2.$

Außerer Durchmesser $32{\cdot}8 \; cm$

b) Jochquerschnitt.

Innerer Durchmesser $9{\cdot}8 \; cm$

$23 : 2 = 11{\cdot}5.$

Kernquerschnitt $= 11{\cdot}5 \,.\, 13{\cdot}7 \,.\, \frac{20}{24} = 131 \; cm^2.$

3. Magnetische Induktion.

$$B = \frac{10^8 \, E_p}{4{\cdot}44 \sqrt{3} \,.\, Z \, Q \sim} \quad . \; . \; . \quad V_3.$$

a) Induktion im Kern.

$$B_k = \frac{10^8 \,.\, 330}{7{\cdot}69 \,.\, 81 \,.\, 189 \,.\, 50} = 5650.$$

b) Induktion im Joch.

$$B_j = 5650 \,.\, \frac{189}{2 \,.\, 131} = 4080.$$

4. Mittlere Windungslänge, Fig. 250 bis 252.

Kernabmessung	160 *mm*,	Fig. 252.
Luft	2 *mm*,	Fig. 252.
Preßspan	6 *mm*,	Fig. 252.
Preßspan	12 *mm*,	Fig. 252.

Breite des Eisenkernes samt Isolation 180 *mm*.

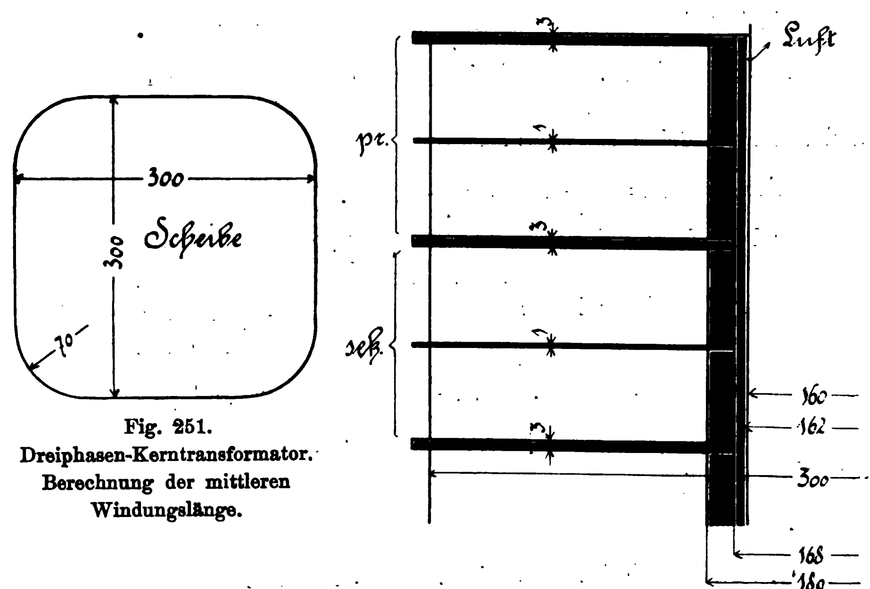


Fig. 251.
Dreiphasen-Kerntransformator.
Berechnung der mittleren
Windungslänge.

Fig. 252. Dreiphasen-Kerntransformator.
Anordnung der Wicklung.

Breite der Bordscheibe 300 *mm*
180 *mm*

Wicklungshöhe $= 120\,mm : 2 = 60\,mm = 2\,r_1$.
Vierfache Eisenkernbreite $= 4 \,.\, 160 = 640\,mm$
$2\,r_1\,\pi =$ $60 \,.\, \pi = 188\,mm$

$\lambda = 828\,mm$ oder
$0{\cdot}828\,m$.

5. Hysteresisverluste.

$$P_h = \frac{\eta\, B^{1\cdot6} \sim V_e}{10^7} \quad . \quad . \quad . \quad I.$$

a) Kern.

$$P_h = \frac{0{\cdot}002 \,.\, 5650^{1\cdot6} \,.\, 50 \,.\, 51600}{10^7} = 520 \text{ Watt, das sind } 1{\cdot}24\%.$$

b) Joch.

$$P_h = \frac{0{\cdot}002 \,.\, 4080^{1{\cdot}6} \,.\, 50 \,.\, 16500}{10^7} = 100 \text{ Watt, das sind } 0{\cdot}24\,\%.$$

6. Wirbelstromverluste.

a) Kern.

$$P_{wk} = \left(\frac{\triangle\, B_k \sim}{10^6\, K}\right)^2 V_e \text{ in Watt} \quad . \; . \; . \quad IV.$$

$$P_{wk} = \left(\frac{0{\cdot}2 \,.\, 5650 \,.\, 50}{10^6 \,.\, 2{\cdot}5}\right)^2 3 \,.\, 17200 = 26 \text{ Watt, das sind } 0{\cdot}06\,\%.$$

b) Joch.

$$P_{wj} = \left(\frac{\triangle\, B_j \sim}{10^6\, K}\right)^2 V_e \text{ in Watt} \quad . \; . \; . \quad IV.$$

$$P_{wj} = \left(\frac{0{\cdot}2 \,.\, 4080 \,.\, 50}{10^6 \,.\, 2{\cdot}5}\right)^2 3.8250 = 6{\cdot}6 \text{ Watt, das sind } 0{\cdot}016\,\%.$$

7. Gesamte Eisenverluste.

Hysteresisverlust in den Kernen	1·24%
Hysteresisverlust in den Jochen	0·24%
Wirbelstromverlust in den Kernen	0·06%
Wirbelstromverluste in den Jochen	0·016%
Gesamte Eisenverluste	1·556%.

8. Kupferverluste.

a) Primärer Kupferverlust.

$$P_{kp} = J_p^2\, W_p \quad . \; . \; . \; . \quad VI.$$

$$W_p = \frac{\lambda \,.\, Z_p}{\gamma \,.\, Q_p} \quad . \; . \; . \; . \quad VIII.$$

Aus den beiden letzten Gleichungen folgt:

$P_{kp} = J_p^2 \dfrac{\lambda\, Z_p}{\gamma \cdot Q_p}$. Nach früherem (§ 187) ist $Z_p = 486$ Windungen. Da jedoch die Windungen (Fig. 253) in zwei Reihen (à 4 Spulen) parallel geschaltet sind, können wir nur 243 Windungen rechnen. $Q_p = 34{\cdot}8 \,.\, 2\, mm^2$. Wir mußten den Querschnitt $34{\cdot}8\, mm^2$ ebenfalls aus dem zuletzt angegebenen Grunde mit 2 multiplizieren.

Somit finden wir $P_{kp} = \dfrac{76^2 \,.\, 0{\cdot}82 \,.\, 243}{55 \,.\, 34{\cdot}8 \,.\, 2} = 73$ Watt, das sind 0·174%.

b) Sekundärer Kupferverlust.

$$P_{ks} = J_s^2 \,.\, \frac{\lambda\, Z_s}{\gamma\, Q_s}.$$

Z_s war gleich 270 Windungen. Die sekundären Windungen (Fig. 253) sind jedoch dreifach parallel geschaltet. Deshalb wird

$$Z_s = \frac{270}{3} = 90.$$

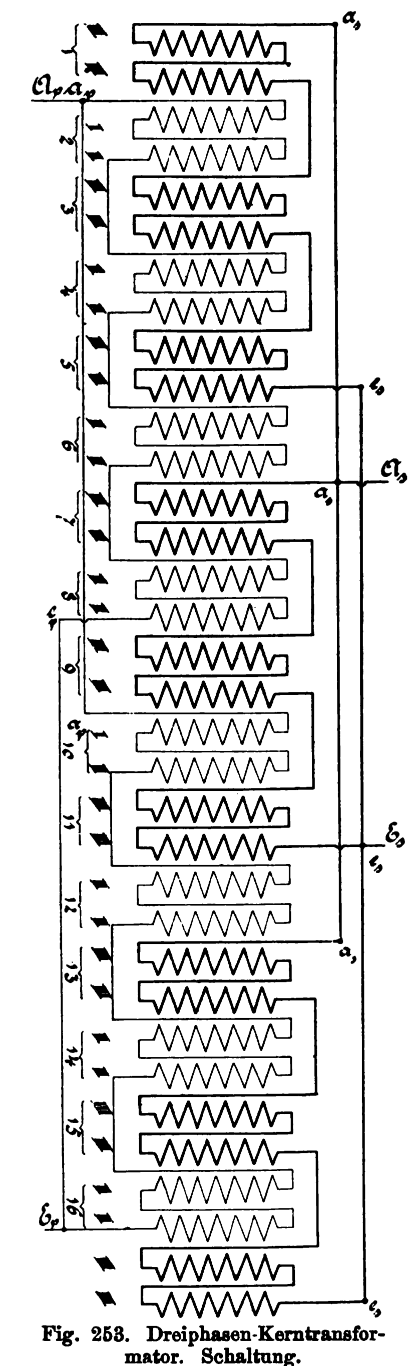


Fig. 253. Dreiphasen-Kerntransformator. Schaltung.

Für Q_s fanden wir 66 mm^2. Wegen der dreifachen Parallelschaltung wird $Q_s = 66 \,.\, 3$. Es ergibt sich also:

$$P_{k\,s} = 202^2 \,.\, \frac{0{\cdot}82 \,.\, 90}{66 \,.\, 3} = \text{rund } 34$$

Watt, das sind 0·081%.

c) Gesamt-Kupferverluste.

a) Primärer Kupferverlust
= 73 Watt = 0·174%,

b) Sekundärer Kupferverlust
= 34 Watt = 0·081%.

Gesamt-Kupferverlust
= 107 Watt = 0·255%.

9. Gesamtverluste.

Gesamt-Eisenverlust	1·556%
Gesamt-Eisenverlust	0·255%
Gesamtverluste	1·811%.

10. Wirkungsgrad. Dem Gesamtverluste = 1·811% entspricht der Wirkungsgrad $G = 98{\cdot}189\%$.

11. Stromstärken.

$$J_p = \frac{42000}{320 \,.\, \sqrt{3} \,.\, 98{\cdot}189} = 76 \text{ Ampère.}$$

$$J_s = \frac{42000}{120 \sqrt{3}} = 202 \text{ Ampère.}$$

188. Das Einphasentransformatordiagramm[1]) nach Kapp. Die Eigenschaften eines Einphasentransformators lassen sich am besten mit Hülfe eines Diagrammes wiedergeben. Um die Darstellung möglichst einfach zu gestalten, nehmen wir an, daß Verluste durch Streuung, Hysteresis und Wirbelströme ausgeschlossen sind. Schickt man in die primären Windungen eines Transformators Wechselstrom, so erzeugt derselbe im Eisen ein magnetisches Feld und dieses ruft in den primären Windungen eine Gegen-*E M K* hervor. Schließt man die sekundären Windun-

[1]) Friedrich Eichberg: Zeitschrift für Elektrotechnik, 1898, Heft 49 und 50, und 1902, Heft 40.

gen, so entsteht in denselben durch gegenseitige Induktion zwischen den primären und sekundären Windungen ein Strom, welcher im Eisen ebenfalls ein magnetisches Feld hervorruft und das durch den primären Strom erzeugte magnetische Feld teilweise oder gänzlich tilgt, je nachdem die primären Ampèrewindungen den sekundären annähernd oder gänzlich gleich sind. Nachdem dann kein magnetisches Feld mehr ins Spiel tritt, wird nun die primäre Gegen-*E M K* gleich *O* und es kann in den primären und sekundären Windungen der volle Strom zu stande kommen. Aus dem Früheren (S. 47 und S. 136) geht hervor, daß im Vektordiagramm Strom und Kraftlinien immer dieselbe Richtung haben, während Kraftlinien und *E M K* aufeinander senkrecht stehen. Die *E M K* erreicht eben immer dann ihren Höchstwert, wenn der Strom die größten Änderungen erleidet, und das ist dann der Fall, wenn derselbe durch Null hindurch geht. Geht also die eine Wellenlinie für den Strom durch Null hindurch, so hat die andere Wellenlinie für die *E M K* ihren Höchstwert erreicht. Die *E M K* ändert sich also mit dem Sinus, das Feld mit dem Kosinus (S. 136), d. h. auch *E M K* und Feld stehen aufeinander senkrecht. Strom und Feld haben demnach im Vektordiagramm dieselbe Richtung.

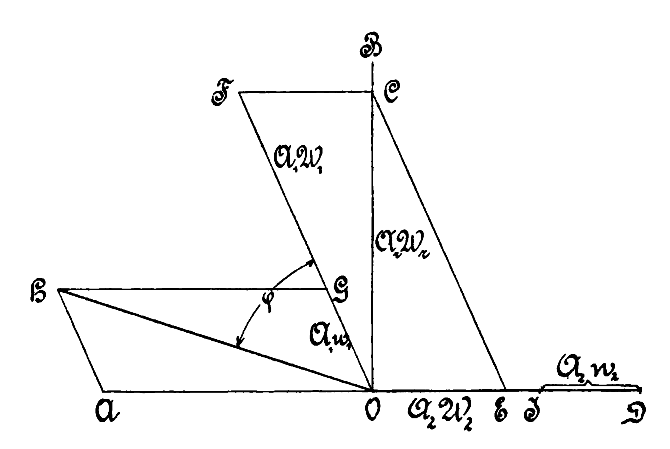


Fig. 254. Einphasen-Transformatordiagramm. Sekundärer Stromkreis induktionsfrei.

1. Fall. Sekundärer Stromkreis induktionsfrei. (Annähernd induktionsfrei sind: Glühlampen, Bogenlampen ohne Drosselspulen, Synchronmotor bei normaler Erregung.) Wir zeichnen, Fig. 254, $O\overline{B} = N$ = Höchstwert der Kraftlinienzahl. Darauf senkrecht stehen die wirksamen *E M K*, und zwar: $O A$ = primäre *E M K* und $O D$ = sekundäre *E M K*. Die primäre und sekundäre *E M K* haben

demnach 180° Phasenverschiebung gegeneinander. Ihre Wellenlinien müssen einander, nach den Gesetzen der Induktion (I. T., 1. B., S. 61), entgegengesetzt gerichtet sein, weil induzierende und induzierte *E M K* einander entgegengesetzt gerichtet sind. Da $O A = O D$ angenommen wurde, so bedeutet dies, daß die primäre und sekundäre Windungszahl einander gleich sind. Diese Annahme wurde deshalb gemacht, weil dann die Figur möglichst deutlich wird. Tatsächlich ist das Verhältnis der Windungszahlen nicht 1 : 1, sonderen etwa 1 : 10, 1 : 20 u. s. w.

Da der sekundäre Stromkreis induktionsfrei ist, fällt die sekundäre Stromstärke in dieselbe Gerade, wie die wirksame *E M K* $O D$. Der Höchstwert der sekundären Ampèrewindungszahl fällt daher auch in dieselbe Gerade und sei $O E = A_2 W_2$. Die höchste Kraftlinienzahl $\overline{N}$ wird durch die resultierende Ampèrewindungszahl $O C = A_r W_r$ erzeugt (S. 18, Fig. 12). Verbindet man E mit C, zieht $O F \parallel E C$ und macht $O F = E C$, so stellt $O F$ den Höchstwert der primären Ampèrewindungszahl $A_1 W_1$ dar. Aus der Figur ersieht man ohneweiters, daß $A_1 W_1$ mit $A_2 W_2$ wächst. Dabei bleibt die resultierende Ampèrewindungszahl $A_r W_r$ konstant. Ist der sekundäre Stromkreis geöffnet, dann muß $A_2 W_2 = O$ sein und es wird $A_1 W_1 = A_r W_r$, d. h. die resultierende Ampèrewindungszahl und die primäre Ampèrewindungszahl sind bei geöffnetem sekundären Stromkreis einander gleich.

Dividiert man die primäre Ampèrewindungszahl $A_1 W_1 = O F$ durch die primäre Windungszahl W_1, so erhält man den Höchstwert der primären Stromstärke $\overline{A}_1$. Setzen wir nun w_1 = Widerstand der primären Wicklung, so ist $A_1 w_1$ = Höchstwert des primären Spannungsverlustes. Letzterer fällt im Diagramm mit der Richtung der Stromstärke zusammen, so daß z. B. $O G = \overline{A}_1 w_1$ ist. Die dem Transformator zuzuführende Klemmenspannung muß einerseits die *E M K* $O A$ erzeugen und anderseits den Ohmschen Spannungsverlust $A_1 w_1$ überwinden. Daraus folgt, daß der Höchstwert der zugeführten Klemmenspannung gleich $O H$ sein muß. Der $\sphericalangle \varphi = \sphericalangle H O F$ stellt demnach die Phasenverschiebung zwischen Strom $\overline{A}_1$ und Klemmenspannung $O H$ dar.

Die Leistung P_1, welche dem Transformator zugeführt wurde, hat nach früherem (S. 85) den Wert:

$$P = \frac{O H}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\overline{A}_1}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi,$$

wobei wir Spannung und Strom durch $\sqrt{2}$ dividiert haben, um von den Höchstwerten $O H$ und $\overline{A}_1$ auf die Effektwerte (S. 38) überzugehen.

Multiplizieren wir die sekundäre Stromstärke $\overline{A}_2$ mit dem sekundären Widerstande w_2, so erhalten wir $\overline{A}_2 \cdot w_2$ = Ohmscher Spannungsverlust in der sekundären Wicklung. Wir können $A_2 w_2$ z. B. $= J I$

wählen, weil sekundäre *E M K* und Ohmscher Spannungsverlust bei induktionsfreier Belastung keine Phasenverschiebung gegeneinander haben, also in dieselbe Gerade fallen. $O\,J = O\,D - J\,D$ stellt demnach den Höchstwert der sekundären Klemmenspannung des Transformators dar.

Die dem Transformator sekundär entnommene Leistung ist

$$P_2 = \frac{O\,J}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\overline{A}_2}{\sqrt{2}}.$$

Somit ist das Güteverhältnis des Transformators

$$G = \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{O\,J \,.\, \overline{A}_2}{O\,H \,.\, \overline{A}_1 \cos\varphi}.$$

2. Fall. Sekundärer Stromkreis induktiv. (Wechselstrommotor, Drosselspule, Transformator bei nicht normaler Belastung, Synchronmotor bei zu geringer Erregung.) Diesen Fall veranschaulicht Fig. 255. Wir benützen wieder die früheren Bezeichnungen. $O\,A =$ = primäre *E M K*, $O\,D =$ sekundäre *E M K*, $O\,B = \overline{N} =$ Richtung der

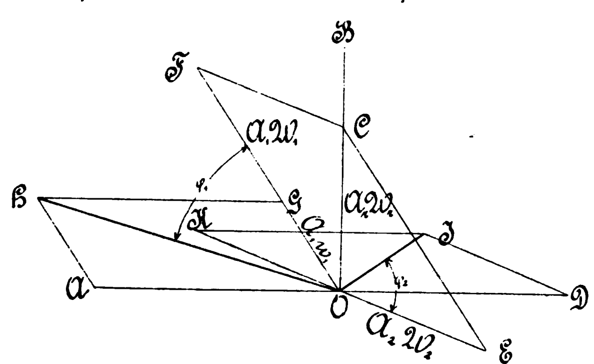


Fig. 255. Einphasen-Transformatordiagramm. Sekundärer Stromkreis induktiv.

resultierenden Kraftlinienzahl. Wir wissen aus dem früheren Fall, daß $O\,A \perp O\,B \perp O\,D$. Die sekundäre Stromstärke beziehungsweise die Ampèrewindungszahl $A_2\ W_2$ bleibt jetzt in der Phase gegen die sekundäre *E M K O D* zurück, weil sekundär ein induktiver Widerstand eingeschaltet ist. $O\,E = A_2\ W_2$ stellt also die Größe und Richtung der sekundären Ampèrewindungszahl dar.

Die sekundäre Klemmenspannung *O J* ist in diesem Falle die geometrische Differenz zwischen *O E* und *O D*. Die sekundäre Klemmenspannung muß kleiner werden als die sekundäre *E M K*, weil sie den sekundären Ohmschen Spannungsverlust zu überwinden hat. Wir konstruieren also die Klemmenspannung nach früherem (S. 18, Fig. 13),

indem wir $E\ O$ nach rückwärts verlängern, so daß $O\ K =$ sekundärer Spannungsverlust $= A_2$. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung sekundär ist demnach durch den $\sphericalangle\ \varphi_2$ wiedergegeben. Nun können wir das Ampèrewindungskräfte-Parallelogramm zeichnen. Verbinden wir E mit C und ziehen $O\ F \parallel E\ C$, so ist $O\ F = A_1\ W_1 =$ $=$ Ampèrewindungszahl primär. Dividiert man $A_1\ W_1$ durch die Windungszahl W_1, so erhält man die primäre Stromstärke.

Ähnlich wie früher finden wir den primären Spannungsverlust, indem wir die primäre Stromstärke A_1 mit dem primären Widerstande w_1 multiplizieren. So erhalten wir $A_1\ w_1 = O\ G$. Die primäre Klemmenspannung muß, so wie im ersten Falle, wieder den Ohmschen Spannungsverlust $O\ G$ überwinden und die primäre $E\ M\ K$ erzeugen und stellt demnach die geometrische Summe zwischen $O\ G$ und $O\ A = O\ H$ dar. Der $\sphericalangle\ \varphi_1$ ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung primär. Da die $E\ M\ K$ sich so wie die Windungszahlen verhalten, so muß $OA = \frac{Z_1}{Z_2} \cdot OD$ sein.

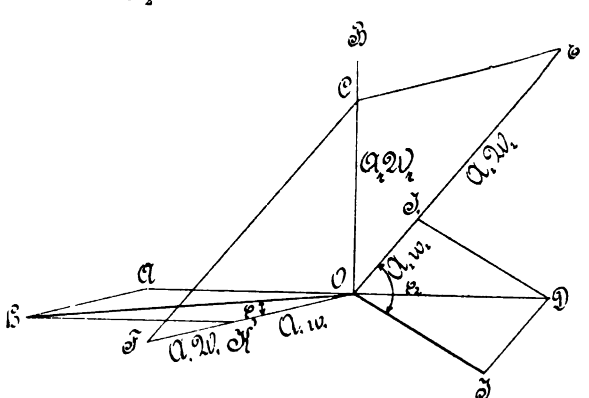


Fig. 256. **Einphasen-Transformatordiagramm. Kondensator im äußeren Stromkreise.**

3. Fall. Kondensator im sekundären Stromkreise. In den sekundären Stromkreis sei z. B. ein sehr langes Kabel eingeschaltet. Bezeichnen wir wie vorher mit $O\ A$, Fig. 256, die primäre $E\ M\ K$, mit $O\ D$ die sekundäre $E\ M\ K$ und mit $O\ B$ die Richtung der Kraftlinien. Die sekundäre Stromstärke A_2 eilt jetzt der sekundären $E\ M\ K$ voran, sie sie ist also so wie die sekundären Ampèrewindungen $A_2\ W_2$ im Sinne einer Voreilung also z. B. auf $O\ E$ aufzutragen. Seien wieder $O\ C = A_r\ W_r$ und $O\ J_1$ der sekundäre Spannungsverlust $A_2\ w_2$, so muß die resultierende Klemmenspannung $O\ J$ eine Komponente der sekundären $E\ M\ K$ $O\ D$ bilden, während die andere Komponente $O\ J_1$ ist. Damit ergibt sich

das Parallelogramm $OJ_1\ DJ$. Verbinden wir E mit C, ziehen durch C eine Parallele zu $O\ E$ und durch O eine Parallele zu $E\ C$, so gibt $O\ F = A_1\ W_1$ die primären Ampèrewindungen an. Dividieren wir die primären Ampèrewindungen durch die Ampère, so finden wir die primären Ampère A_1, und multiplizieren wir die primären Ampère A_1 mit dem primären Widerstande w_1, so ergibt sich der primäre Spannungsverlust $A_1\ w_1$. $A\ O$ und $A_1\ w_1$ sind nun wieder die Komponenten der primären Klemmenspannung $O\ H$. φ_1 stellt den Phasenverschiebungswinkel zwischen dem primären Strom und der primären Spannung dar, φ_2 dagegen ist der Phasenverschiebungswinkel zwischen sekundärem Strom und sekundärer Spannung.

189. Kondensatoren als Transformatoren. Theoretisch sind auch Kondensatoren zur Umsetzung der Elektrizität verwendbar. Die bisher angestellten Versuche haben jedoch in der Praxis keine besondere Bedeutung erlangt.

II. Kapitel.

Gleichstromumsetzer.

190. Einteilung. Die Umsetzung von Gleichstrom[1]) erfolgt durch folgende Anordnungen:

1. Zwei Dynamomaschinen, welche miteinander mechanisch verbunden sind.

2. Zwei Dynamomaschinen, deren Magnetgestelle ein Gußstück bilden und deren Induktoren auf derselben Welle sitzen.

3. Eine Dynamomaschine mit zwei verschiedenen Wicklungen auf dem Anker.

4. Eine Dynamomaschine in Verbindung mit einem Sammler.

Eine praktische Bedeutung haben bisher nur die Anordnungen 2, 3 und 4 erlangt.

191. Zwei Dynamomaschinen mit verschiedenen Wellen. Die Umsetzung eines Gleichstromes in einen zweiten läßt sich mit irgend zwei getrennten Gleichstrommaschinen durchführen. Die erste Maschine wird als Motor mit dem zu umsetzenden Strome angetrieben; verbindet man diese Maschine mit einer zweiten z. B. durch Riemenübertragung, so läuft die zweite Maschine an und gibt, wenn dieselbe für höhere Spannung und niedere Stromstärke als die erste Maschine gewickelt ist, einen Strom von höherer Spannung und niederer Stromstärke als die erste ab. Ist die zweite Maschine für niederere Spannung und höhere Stromstärke als die erste Maschine gewickelt, dann gibt dieselbe einen Strom von niedriger Spannung und höherer Stromstärke als die erste ab.

[1]) Siehe auch Friedrich Eichberg: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 563.

192. Zwei Dynamo mit derselben Welle (Motordynamo). Diese Anordnung unterscheidet sich von der im letzten Paragraphen angegebenen nur dadurch, daß die Induktoren beider Maschinen auf derselben Welle aufgebaut sind und die Eisenkörper der beiden Maschinen zumeist ein Ganzes bilden.

Konstruktionen dieser Art sind von Marcel Deprez, der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co. und der Siemens & Halske A.-G. praktisch ausgeführt worden.

193. Zwei Dynamo mit zwei verschiedenen Wicklungen auf demselben Anker. Das Wesen dieser Umsetzer stammt von Thomas Alva Edison. Der Eisenkern des Induktors bildet den Träger für zwei verschiedene, voneinander wohl isolierte Wicklungen. An jeder Stirnfläche der Wicklung sitzt je ein Kollektor auf der Welle. Der umzusetzende Strom tritt in die eine Wicklung ein, der umgesetzte Strom aus der anderen Wicklung aus. Das Verhältnis der primären und sekundären Windungen bestimmt, so wie bei jedem Umsetzer, das Verhältnis der primären und sekundären Spannung. Die Wicklungen füllen entweder abwechselnd Nuten im Anker aus oder sie sind übereinander gewickelt. Durch letztere Anordnungen hebt die Selbstinduktion des einen Stromkreises diejenige des anderen auf, wodurch die Stromabnahme an den Kollektoren bei jeder beliebigen Belastung ohne die geringste Funkenbildung und das Verstellen der Bürsten vor sich geht.

194. Eine Dynamo in Verbindung mit einem Sammler. Die Durchführung dieses Systems besteht darin, daß der Strom einer hochgespannten Gleichstromdynamo durch eine Fernleitung in einen Sammler mit einer großen Zellenzahl geschickt wird.

Die zur Ladung einer Zelle erforderliche Spannung beträgt rund 2·8 Volt. Sind demnach 500 Zellen hintereinander geschaltet, so ergeben sich für die Spannung der Dynamo, außer dem Spannungsverluste in der Leitung,

$$2{\cdot}8 \times 500 = 1400 \text{ Volt Ladesspannung.}$$

Von beliebigen Zellen des Sammlers aus kann man nun mit beliebigen Spannungen arbeiten.

Bei dieser Methode ist es ermöglicht, die Dynamo immer mit voller Leistung (größtem Güteverhältnisse) zu beanspruchen, wenn auch die Nutzbelastungen verschieden sind. Der Sammler regelt in diesem Falle den Stromverbrauch, indem er bei geringeren Belastungen der Dynamo den Strom aufspeichert.

195. Bemerkung. Die Nachteile der Gleichstromumsetzer im Vergleiche zu den entsprechenden Apparaten für Wechselstrom sind folgende:

1. Hohe Anschaffungskosten.
2. Die Beweglichkeit der Teile.
3. Die Anwendung beschränkt hoher Spannungen. Infolge der bisher niedrigen Spannungen der Gleichstromumsetzer sind dieselben für die Übertragung auf sehr große Entfernungen nicht geeignet, während Wechselstromumsetzer die Elektrizität bisher auf Entfernungen bis zu 175 *km* (Lauffen-Frankfurt a. M.) wirtschaftlich übertragen haben. Bei der Fortleitung der Elektrizität auf geringe Entfernungen, zu Kraftübertragungs-, elektrochemischen und Meßzwecken dagegen wird fast allgemein nur Gleichstrom verwendet. Die vereinigten Vorzüge der Gleich- und Wechselströme und ihre Anwendung für alle Zwecke des praktischen Lebens haben der Elektrotechnik jene hervorragende Stellung eingeräumt, die sie seit vielen Jahren schon besitzt.

III. Kapitel.

Wechselstrom-Gleichstromumsetzer.

196. Wesen. Verbindet man eine Gleichstrom- mit einer Wechselstrommaschine durch irgend eine mechanische Übersetzung, so kann man mit Hülfe dieser Anordnung

1. Wechselstrom in Gleichstrom und
2. Gleichstrom in Wechselstrom umsetzen.

Die mechanische Verbindung beider Maschinen kann so wie bei Gleichstromumsetzern, welche aus zwei Maschinen bestehen, entweder durch eine einfache Riemenverbindung beider Maschinen oder durch das Aufbauen des Gleichstrom- und Wechselstrominduktors auf dieselbe Welle erfolgen.

Schickt man in die Wechselstrommaschine einen Wechselstrom, so läuft dieselbe an und die mit ihr verbundene Gleichstrommaschine gibt Gleichstom ab und umgekehrt.

So wie einphasige kann man mehrphasige Wechselströme in Gleichströme und umgekehrt umsetzen.

197. Universalmaschine. Eine vielpolige Dynamo kann, mit zwei Gleichstromkollektoren und mindestens 6 Schleifringen versehen, für sämtliche Zwecke der elektrotechnischen Industrie Anwendung finden. Diese Universalmaschine ersetzt insbesondere folgende Maschinen, Motoren und Umsetzer einzeln oder in beliebigen Zusammenstellungen:

1. Gleichstrommaschine.
2. Gleichstrommotor.
3. Wechselstrommaschine.
4. Wechselstrommotor.
5. Gleichstromumsetzer.
6. Ein- und mehrphasiger Wechselstromumsetzer.

Für alle Anordnungen, in welchen auch Wechselstrom vertreten ist, sind vielpolige oder sehr schnell laufende Maschinen anzuwenden, für alle jene Anordnungen dagegen, in welchen bloß Gleichstrom vertreten ist, genügen bei niedrigen und mittleren Leistungen zweipolige Maschinen.

IV. Kapitel.

Beschreibung ausgeführter Transformatoren.

198. Der Drehstromtransformator der Siemens & Halske A.-G. Der Eisenkörper dieses in Fig. 257 perspektivisch dargestellten Transformators besteht aus drei senkrecht aufgestellten Eisenkernen, welche

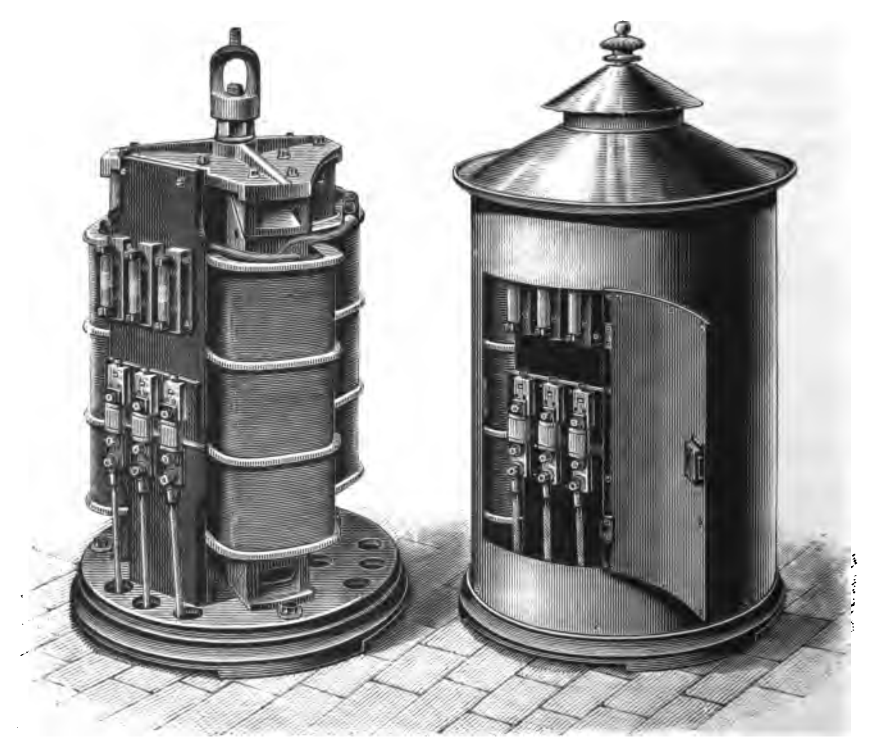


Fig. 257. Dreiphasen-Kerntransformator der Siemens & Halske A.-G.

durch zwei Gußplatten, die ein kräftiger Bolzen zusammenpreßt, zusammengehalten werden. Auf den isolierten Eisenkernen sind zunächst die sekundären und auf diese die primären Spulen aufgesetzt. Um den Transformator gegen Witterungseinflüsse zu schützen, ist derselbe in ein Blechgehäuse eingeschlossen, dessen kegelförmiges Dach eine durch ein Regendach abgeschlossene Ventilationsöffnung besitzt. Die untere Gußplatte enthält eine Anzahl von Öffnungen, durch welche die Leitungen führen; sie dienen gleichzeitig zur Durchlüftung des Apparates. Zwischen den beiden Gußplatten ist ein Brett verschraubt, auf welchem die Leitungsklemmen und Bleisicherungen aufmontiert sind. Eine Tür macht dieses Brett leicht zugänglich. Das Blechgehäuse steht auf der

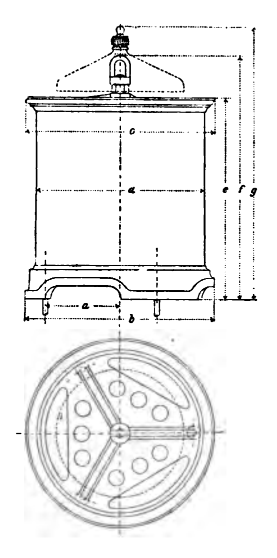


Fig. 258.
Drehstromtransformator.
Abmessungen.

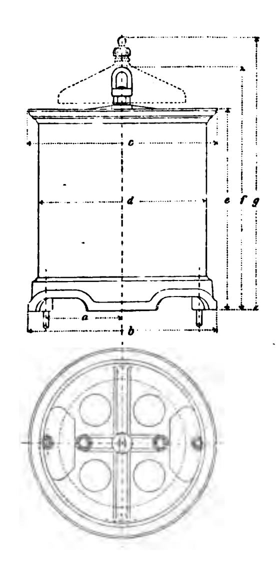


Fig. 259.
Wechselstromtransformator.
Abmessungen.

Grundplatte des Transformators und kann nach Lösung einiger Schrauben abgehoben werden. Transformatoren dieses Modells wurden zunächst für das Elektrizitätswerk zu Erding [1]) praktisch verwendet.

Für einphasigen Wechselstrom werden anstatt drei Kernen zwei Kerne verwendet. Die äußeren Abmessungen dieser Vorrichtungen geben die folgenden Tabellen und Figuren 258 und 259 wieder.

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, Berlin 1893, S. 558 ff.

Tabelle für die Abmessungen der Drehstromtransformatoren.
Die angegebenen Maße sind Millimeter.

Kilowatt	a	b	c	d	e	f	g
2·5	235	595	595	530	630	760	850
5	300	720	720	655	690	855	940
7·5	300	720	720	655	690	855	940
10	305	730	740	675	850	1020	1110
15	350	820	830	765	870	1065	1150
20	350	820	830	765	1070	1265	1350
30	405	980	1020	885	1250	1515	1660
50	425	1020	1060	925	1500	1730	1900
75	490	1160	1200	1065	1540	1855	2025
100	490	1160	1200	1065	1540	1855	2025
150	550	1300	1320	1185	1840	2155	2285
200	610	1400	1440	1305	2150	2455	2625

Tabelle für die Dimensionen der Wechselstromtransformatoren.
Die angegebenen Maße sind Millimeter.

Kilowatt	a	b	c	d	e	f	g
1	210	510	530	475	470	590	675
2·5	240	590	590	530	610	745	830
5	295	720	710	665	660	825	910
7·5	300	730	740	675	820	990	1075
10	350	820	830	765	870	1065	1160
15	350	820	830	765	1070	1265	1360
20	405	980	1020	885	1245	1500	1635
30	425	1020	1060	925	1500	1750	1880
50	480	1160	1200	1065	1540	1830	1960
75	480	1160	1200	1065	1540	1830	1960
100	540	1300	1320	1185	2070	2145	2280
150	610	1400	1440	1305	2140	2455	2285

Modell *T*, Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom, senkrechte Kerne. Für Einphasenstrom *WT* in 12 Größen von 1 bis 150 *KW*, für Drehstrom *DT* in 14 Größen von 1 bis 200 *KW*.

Der Gleichstromumsetzer der Siemens & Halske A.-G., Fig. 260. Die Magnetgestelle zweier Maschinen der Type *LH* bestehen aus einem gemeinsamen Gußkörper. Auf der Welle des Umsetzers sind, den beiden Magnetgestellen zugehörig, 2 Trommeln aufgebaut. Der umzusetzende Strom tritt in die eine Trommel ein und setzt so beide Trommeln in Bewegung. Beide Trommeln laufen demnach mit derselben Umdrehungszahl. Die zweite Trommel gibt nun, wenn sie anders gewickelt ist wie die erste, einen Strom von anderer Spannung und Stromstärke als der in die erste Trommel eintretende Strom. Das Verhältnis der Windungszahlen der beiden Anker gibt zugleich das Verhältnis der primären und sekundären Spannungen an. Hat der zweite Anker mehr Windungen als der erste, so wird der in die erste Maschine (den Motor) eintretende Strom in der zweiten Maschine (der Dynamo) in einen solchen von hoher Spannung umgesetzt; hat der zweite Anker weniger Windungen als der erste, dann ist die Spannung des aus der zweiten Maschine austretenden Stromes niedriger als die des in die erste Maschine eintretenden Stromes.

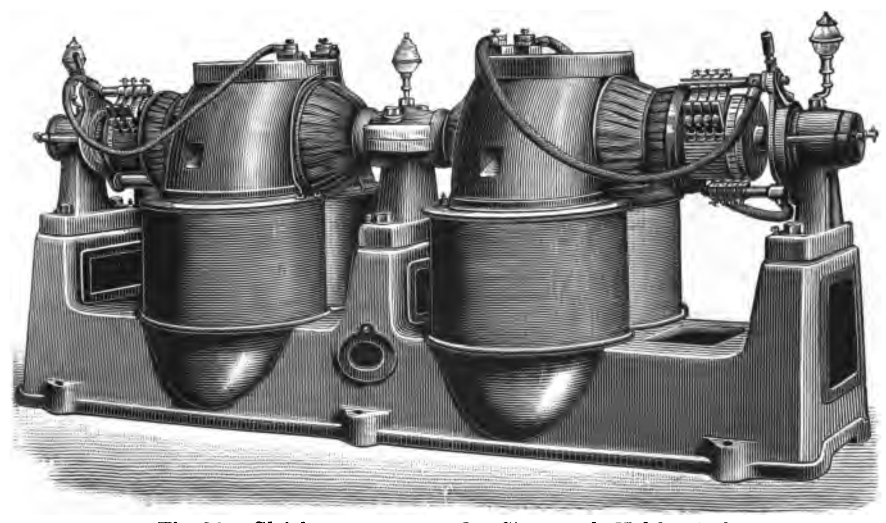


Fig 260. Gleichstromumsetzer der Siemens & Halske A.-G.

199. Transformatoren der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. in Nürnberg und der **Österreichischen Schuckert-Werke** in Wien.

Die in Wechselstromanlagen zur Spannungsumsetzung dienenden Transformatoren dieser Firma werden in zwei Haupttypen, dem Mantel- und Kerntypus, ausgeführt.

Der Manteltypus ist dadurch gekennzeichnet, daß die Kupferdrahtspulen, in welchen sich die elektrischen Vorgänge abspielen, vollständig von dem Gestelle des Transformators umschlossen werden. Fig. 261 und 262 zeigen die äußere Ausführungsform, und zwar Fig. 261 für Einphasen-, Fig. 262 für Dreiphasenstrom. Diese beiden Transformatoren wurden an früherer Stelle (§ 181 und § 184) berechnet. In Fig. 263 und 264 ist ein Drehstromtransformator in zerlegtem Zustande abgebildet.



Fig. 261. Einphasen-Manteltransformator.

Der Eisenkörper ist teils aus U- beziehungsweise doppel-U-förmigen, teils rechteckig ausgestanzten Weicheisenblechscheiben, welche sorgfältig voneinander isoliert und durch entsprechend angeordnete Bolzen zu einem massiven Körper zusammengezogen sind, hergestellt. Die Kupferwindungen werden primär und sekundär abwechselnd auf das Zwischenstück aufgeschoben und das Ganze dann durch ein außen angeordnetes Zugstangensystem zusammengeschraubt und mit dem Kopf- und Fußstück verbunden. Ersteres ist mit Haken für den Transport versehen und enthält die auf Marmorplatten montierten Anschlußklemmen. Letzteres ist so ausgebildet, daß der eigentliche Transformator entsprechend hoch vom Erdboden aufgestellt ist und von der Luft allseitig frei umspült werden kann. Bei der Herstellung der Kupferdrahtspulen wird die höchste Sorgfalt auf die Isolation der einzelnen Windungen voneinander und der Spulen unter sich verwendet. Die zur Anwendung kommende Isolationsmethode ist eine seit Jahren ausprobierte und vollkommen bewährte.

Für Betriebsspannungen bis zu 7000 Volt und Leistungen bis etwa 100 Kilowattampère werden die Transformatoren trocken isoliert, und zwar findet für Leistungen bis etwa 50 Kilowattampère der beschriebene Manteltypus, für Leistungen von 50—100 Kilowattampère der weiter unten beschriebene Kerntypus Anwendung.



Fig. 262. **Dreiphasen-Manteltransformator.**

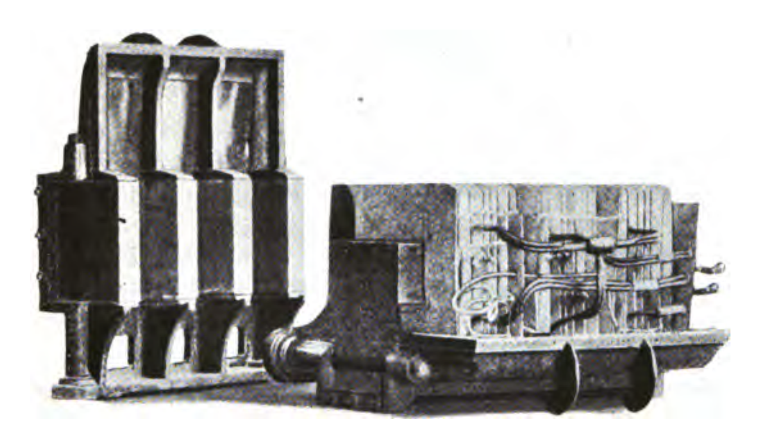


Fig. 263. **Dreiphasen-Manteltransformator,** zerlegt.

Kommen Spannungen über 7000 Volt und große Leistungen in Frage, so wird im Interesse einer stärkeren Isolation und besseren Abkühlung der fertige Transformator in einen Kessel montiert und mit einem Öle, welches einer besonderen Vorpräparation unterliegt, bedeckt.

Die Blechkessel sind bei den kleinen Typen glatt, bei den größeren Typen zur Vergrößerung der Abkühlungsoberfläche entweder als Rippenkörper ausgeführt oder aus Wellblech hergestellt.

Derartig eingebaute Transformatoren mit Selbstkühlung erwärmen sich auch bei dauernder Vollbelastung nur wenig, wenn die Vorrichtungen genügend luftig aufgestellt werden können. Ist dies nicht der Fall und ist der Aufstellungsraum ein so beschränkter, daß die gegenseitige Entfernung der einzelnen Transformatoren unter 1 *m* herabgeht, so genügt die natürliche Ventilation nicht und es wird dann eine künstliche Abkühlung angewendet, die dadurch erreicht wird, daß mittels eines Ventilators zwischen den Kessel und einen um denselben gelegten Mantel ein Luftstrom geblasen wird.



Fig. 264.
Dreiphasen-Manteltransformator.
Blechkörper.

In besonderen Fällen werden die größeren Öltransformatoren auch wohl in der Weise gekühlt, daß die Kesselwände durch Wasser berieselt werden, welches mittels eines um den oberen Teil des Kessels gelegten Rohres mit vielen kleinen Löchern zugeführt wird.

Müssen die Öltransformatoren in besonders feuchten Räumen Aufstellung finden, so werden dieselben mit einer luftdichten Dichtung der Klemmen geliefert. Transformatoren dieser Ausführung werden bis zu 20.000 Volt und bis zu 1200 Kilowattampère-Leistung als normale Typen ausgeführt. Es wurden jedoch schon in besonderen Fällen Transformatoren mit Spannungen bis 100.000 Volt gebaut.

Für mittlere Leistungen von 50 bis 100 Kilowattampère und für Spannungen bis zu 7000 Volt kommen, wie bereits erwähnt, Ein- und

Dreiphasentransformatoren zur Anwendung. Einen Dreiphasentransformator veranschaulicht Fig. 265. Die Berechnung dieses Transformators wurde in § 187 durchgeführt.

Bei diesen Vorrichtungen liegt der wirksame Eisenkern, welcher ebenfalls aus voneinander isolierten Blechscheiben besteht, im Innern der Kupferdrahtspulen. Gegen äußere mechanische Beschädigung sind die Vorrichtungen durch eine Blechumkleidung geschützt.



Fig. 265. Dreiphasen-Kerntransformator.

Da die Transformatoren gewöhnlich ständig unter Spannung stehen, dürfen die Leerlaufverluste derselben nur sehr geringe Werte erreichen. Hiezu ist aber neben günstiger Verfügung, in elektrischer und magnetischer Hinsicht, sorgfältigste Auswahl des zur Anwendung kommenden Eisens und Kupfers erforderlich. Diese Materialien unterliegen deshalb in den Laboratorien der Elektrizitäts-Aktiengesellschaft vorm. Schuckert & Co. einer ständigen sorgfältigen Überwachung und die Transformatoren entsprechen in dieser Hinsicht allen billigen Anforderungen.

Der Wirkungsgrad bei induktionsfreier Vollbelastung beträgt bei dem kleinsten Modell mit einer Leistung von 0·5 Kilowattampère 89%, bei den mittleren Größen 96%, bei den großen Typen steigt der Wirkungsgrad bis auf 98%.

Der Spannungsabfall von Leerlauf bis Vollbelastung ist selbst bei induktiver Belastung ein so geringer, daß, konstante Primärspannung vorausgesetzt, die Sekundärspannung innerhalb praktischer Grenzen als konstant zu betrachten ist. Der Betrieb der Zentrale wird daher ein leichter, da die erforderliche Regulierung sich in engen Grenzen hält.

In Fällen, in welchen eine Transformatoranlage häufig lange unbelastet ist, kann man deren Wirkungsgrad durch Anwendung eines eigenen Ausschalters erhöhen. Durch diese Vorrichtung wird beim Unterbrechen des Sekundärstromkreises auch der Primärstromkreis ausgeschaltet und somit Leerlaufverluste vollständig vermieden.

Angaben über ausgeführte Transformatoren:

Einphasen-Manteltransformator *Tme* 20.

Leistung 20 Kilowatt.
Spannung primär 2000 Volt.
Spannung sekundär 110 „
Strom primär 10·5 Ampère.
Strom sekundär 182 „

Primäre Wicklung.

464 Windungen.
2 Spulen à 132 Windungen.
Spule à 33 Lagen à 4 Windungen Nr. I.
2 Spulen à 100 Windungen.
Spule à 33 Lagen à 3 Windungen und 1 Lage à 1 Windung Nr. II.
Kupferdimensionen 3·4/3·8 Ø.

Sekundäre Wicklung.

2 × 26 Windungen.
4 Spulen à 13 Windungen à 13 Lagen à 1 Windung, Nr. III.

Kupferdimensionen: 3·6 × 11 *mm*, 2mal übereinander mit Band und 0·2 *mm* Preßspan isoliert.
Seitenwände aus Preßspan 2 *mm*.
Zwischenisolation der Doppelspulen primär 2 *mm*.
Zwischenisolation der Doppelspulen sekundär 0·5 *mm*.
Eisenbreite 72·5.
Höhe 305.
Bleche 0·2.
Papier 0·04.
Schaltung: Spule 1 einmal aus Nr. II.
Spule 2 zweimal aus Nr. III.
Spule 3 einmal aus Nr. II und I.
Spule 4 zweimal aus Nr. III.
Spule 5 einmal aus Nr. I.
Spule 1, 3, 5 hintereinander.
Spule 2, 4 parallel.

Dreiphasen-Manteltransformator *Tmd* 21.

Leistung 21 Kilowatt.
Spannung primär 2000 Volt.
Spannung sekundär 120 „
Strom primär 6·3 Ampère.
Strom sekundär 101 „

Primäre Wicklung.

3 × 424 Windungen.
3 × 2 Spulen à 121 Windungen.
Spule à 30 Lagen à 4 Windungen und 1 Lage à 1 Windung Nr. I.
3 × 2 Spulen à 91 Windungen.
Spule à 30 Lagen à 3 Windungen und 1 Lage à 1 Windung Nr. II.
Kupferdimensionen 2 6/3·0 Ø.

Sekundäre Wicklung.

3 × 2 × 26 Windungen.
3 × 2 × 2 Spulen à 13 Windungen à 13 Lagen à 1 Windung Nr. III.

Kupferdimensionen: 6·8 × 8 mit 0·3 Band und 0·2 Preßspan.
Seitenwände aus Preßspan 2 *mm*.
Zwischenisolation der Doppelspulen primär 2 *mm*.
Zwischenisolation der Doppelspulen sekundär 0·5 *mm*.
Eisenbreite 60.
Höhe 250.
Bleche 0·2.
Papier 0·03.
Schaltung: Spule 1 einmal aus Nr. I.
Spule 2 zweimal aus Nr. III.
Spule 3 einmal aus Nr. I und II.
Spule 4 zweimal aus Nr. III.
Spule 5 einmal aus Nr. II.
Spule 1, 3, 5 hintereinander.
Spule 2, 4 parallel.

Übersicht.

Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom.

Modell *Te* Einphasentransformator. 13 Größen von 0·5 bis 40 Kilowatt nach dem Manteltypus. Höchste Spannung 7000 Volt. Kräftiger Zusammenbau des Blechkörpers, daher möglichste Verminderung des Tönens. Vier Größen von 50 bis 100 Kilowatt, nach dem Kerntypus bis 7000 Volt, in Öl 10.000 Volt. Zwei wagrecht übereinander gelagerte Blechkerne mit nebeneinander angeordneten primären und sekundären Spulen.

Modell *Tdm* Dreiphasenstromtransformator. Acht Größen für 1·5 bis 33 Kilowatt nach dem Manteltypus, D. R. P. Nr. 93254. Höchste Spannung 7000 Volt. Sieben Größen für 100 bis 500 Kilowatt, in Öl von 10.000 bis 20.000 Volt.

Modell *Td* Dreiphasentransformator. Eine Größe für 42 bis 285 Kilowatt nach dem Kerntypus bis 7000 Volt. Drei aufrecht stehende Blechkerne mit nebeneinander gelagerten primären und sekundären Spulen.

200. Drehstromtransformator der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin. In Fig. 266 ist des besonderen Interesses halber ein Transformator abgebildet, welcher anläßlich der elektrischen Ausstellung in Frankfurt a. M. (1891) bei der Übertragung von 300 *PS* von Lauffen a. N. nach dem Ausstellungsplatze in Frankfurt a. M. auf eine Entfernung von 175·5 *km* (I. T., 2. B., S. 309) Verwendung fand. Dieser Transformator war für eine Leistung von 100.000 Watt bei einem Übersetzungsverhältnisse 1 : 160 gebaut.

Sein Eisenkörper bestand aus drei Eisenkernen. Die drei Eisenkerne waren aus dünnen Eisenblechen aufgebaut und oben sowie unten durch aus Eisenbändern hergestellte Ringe verbunden. Die inneren Bewicklungen der Kerne bildeten die dicken, die äußeren die dünnen Windungen. Jeden Kern durchfloß ein Strom bestimmter Phase. Die Phasen der drei primären Ströme in den drei primären Wicklungen waren um 120° gegeneinander verschoben. Zur Fernhaltung der Feuchtigkeit wurden sämtliche Isoliermittel in schwerem Harzöl gekocht und nach Füllung des Transformators mit Öl nochmals erwärmt. Behufs Aufnahme des Öles stand der Transformator in einem schmiedeeisernen Zylinder.

Im folgenden sind die neuesten Konstruktionen obiger Firma wiedergegeben.

Transformatoren.

Die Transformatoren, welche z. B. die bei Kraftübertragungen auf weite Entfernungen nötige Umwandlung der Spannung bewirken, be-

stehen aus einem mit Windungen versehenen System von Eisenkernen. Sie lassen sich sowohl für einfachen Wechselstrom wie auch für Drehstrom, Fig. 267, herstellen. Im letzteren Falle ist der Eisenkern dreiteilig.



Fig. 266. Drehstromtransformator.

Auf jedem dieser Kerne befinden sich zwei Arten von Windungen, die sich in Bezug auf die Windungszahlen wie die Spannungen verhalten, so daß also die Spule für die hohe Spannung viele Windungen besitzt, die der niederen Spannung entsprechend weniger.

Um eine möglichst gute Isolierung zu erhalten und die Gefahr des Durchschlagens auf ein möglichst geringes Maß zu beschränken, ist die Hochspannungswicklung sowohl von der Niederspannungswicklung wie auch vom Eisen des Kernes durch eine entsprechend starke

Schicht Glimmer oder Mikanit zu trennen. Die Niederspannungswicklung kann vom Eisenkern durch Stabilit oder Preßspan isoliert werden.

Bei hohen Spannungen und größeren Leistungen wird zur Erreichung einer besonders guten Isolation der ganze Transformator zweckmäßig in einem mit Öl gefüllten Behälter eingebaut.

Übersicht.

Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom, Modell *W A* mit zwei, Modell *DB* und *DC* mit drei Kernen; 50 bis 75 Perioden. *WA* in 12 Größen von 1 bis 100 *KW*, *DB* in 13 Größen von 2 bis 200 *KW*, *DC* (mit geringem Leerlauf) in 8 Größen von 2 bis 30 *KW*.



Fig. 267. Drehstromtransformator ohne Schutzkappe.

Drehstrom-Gleichstromumformer.

Für die Umwandlung von Drehstrom (beziehungsweise Wechselstrom) in Gleichstrom oder umgekehrt finden Umformer Verwendung, und zwar werden Zweimaschinenumformer und Einmaschinenumformer unterschieden. Bei ersteren ist ein regelrechter Drehstrommotor unmittelbar mit einer Gleichstromdynamo gekuppelt. Beide Maschinen können zusammen drei Lager besitzen, Fig. 268, oder es wird ein gewöhnlicher zweilageriger Motor mit einer gewöhnlichen zweilagerigen Dynamo gekuppelt.

Bei dem Einmaschinenumformer führt dieselbe Wicklung sowohl Drehstrom wie Gleichstrom.

Bei dem Zweimaschinenumformer dagegen führt jede Maschine ihre besondere Stromart. Bei letztgenannter Maschinenart wird unterschieden:

a) Zweimaschinenumformer mit synchronem Motor,

b) Zweimaschinenumformer mit asynchronem Motor.

Über die Zweckmäßigkeit der einen oder der anderen Umformerart läßt sich eine allgemein gültige Entscheidung nicht treffen. Die A. E.-G., welche Umformer nach sämtlichen Systemen gebaut hat, empfiehlt in erster Linie Asynchron-Zweimaschinenumformer. Dieselben haben allerdings gegenüber den Einmaschinenumformern einen etwas schlechteren Wirkungsgrad, sie sind auch im Vergleich mit Synchron-



Fig. 268. Zweimaschinenumformer.
Drehstrom-Gleichstrom mit drei Lagern auf gemeinsamer Grundplatte.

Zweimaschinenumformern insofern etwas im Nachteil, als bei ihnen *cos* φ kleiner als 1 ist und dadurch Kabel, Transformatoren und Dynamomaschinen etwas höher in Ampère belastet werden, als es bei Synchronmotoren der Fall ist. Sie haben aber dagegen die Vorzüge, die ein Asynchronmotor einem Synchronmotor gegenüber überhaupt besitzt. Sie können selbständig ohne äußeren Antrieb anlaufen und sind gegen Überlastungen bei Kurzschlüssen im Netz u. s. w. weit weniger empfindlich wie der Synchronmotor.

Der Synchron-Zweimaschinenumformer muß dagegen bei jeder Inbetriebsetzung zunächst auf seine Umdrehungszahl gebracht werden, und zwar entweder durch einen äußeren Antrieb oder unter Zuhülfenahme einer Akkumulatorenbatterie, mittels welcher die Gleich-

stromdynamo gespeist und als Gleichstrommotor angelassen wird. Hierauf erfolgt die Einschaltung des Synchronmotors genau in derselben Weise, wie das Parallelschalten zweier Drehstromdynamos, so daß unter Umständen dieser Synchronmotor sogar mit Dämpfern versehen werden muß.

Der oft gerühmte Vorzug, durch Übererregung (d. h. Verstärkung des Magnetfeldes) das *cos* φ der Gesamtanlage zu verbessern, indem dann der Synchronmotor als wattlose Maschine arbeitet, also einen wattlosen Strom liefert, der denjenigen der Anlage aufzuheben sucht, kommt dabei nicht wesentlich in Betracht.

Der Einmaschinenumformer ist stets ein Synchronumformer, muß also wie der vorher beschriebene Synchron-Zweimaschinenumformer gleichfalls vor dem Einschalten auf die richtige Umdrehungszahl gebracht werden, auch sind hier ebenfalls alle Manipulationen wie beim Parallelschalten zweier Drehstromdynamos durchzumachen.

Außerdem steht hier die erzeugte Gleichstromspannung stets in einem ganz bestimmten Abhängigkeitsverhältnis zur primären Drehstrom- (resp. Wechselstrom-) Spannung. Bei dem gewöhnlichen Einphasenumformer ist 70 Volt Wechselstrom entsprechend etwa 100 Volt Gleichstrom; bei dem gewöhnlichen Drehstromumformer entsprechen 60 Volt Drehstrom etwa 100 Volt Gleichstrom. Hieraus ergibt sich, daß bei vorhandener Drehstromspannung meistens erst eine Transformation nötig ist, um Gleichstromspannung von 110 respektive 220 oder 500 Volt zu erhalten.

Es müssen also in den gewöhnlichen Stromkreis Transformatoren eingeschaltet werden, die den sehr guten Wirkungsgrad dieser Einankerumformer natürlich beeinträchtigen.

Ferner ist es in vielen Fällen z. B. für das Laden von Akkumulatoren notwendig, eine veränderliche Gleichstromspannung zur Verfügung zu haben. Für diesen Fall muß der Transformator mit einem veränderlichen Übersetzungsverhältnis eingerichtet werden und einzelne Spulengruppen müssen mit einer zellenschalterähnlichen Einrichtung zu- oder abgeschaltet werden.

Da das Magnetfeld für Gleichstrom und Drehstrom ein und dasselbe ist und man zur Erhaltung des oft gerühmten *cos* φ von 1 eine ganz bestimmte Magneterregung einzustellen hat, muß man sich mit der jeweils sich ergebenden Gleichstromspannung zufrieden geben. Will man anderseits die Gleichstromspannung durch den Magnetismus verändern, was allerdings nur in ganz kleinen Grenzen von etwa höchstens 5% möglich ist, so muß man auf das $\cos \varphi = 1$ verzichten und durch starke Über- respektive Untererregung die geringe Spannungsveränderung bewerkstelligen.

Hiebei entsteht nun der Nachteil, daß gerade diese Feldverstärkung beziehungsweise Feldschwächung, welche beim Über- beziehungsweise Untererregen auftritt, nur durch Ankerreaktion, d. h. durch einen wattlosen Strom hervorgerufen werden kann, der die ganze Ankerwicklung und nicht wie der umgeformte Wattstrom nur teilweise die Ankerwicklung durchfließt.

Durch diesen wattlosen Strom wird also die Wicklung stark beansprucht und ist man gezwungen, falls die Veränderung der Spannung in der oben beschriebenen Weise verlangt wird, auf einen der großen Vorteile, d. h. die Kompaktheit der Einmaschinenumformer, zu verzichten und wegen der Erwärmung des Ankers größere Typen zu wählen.

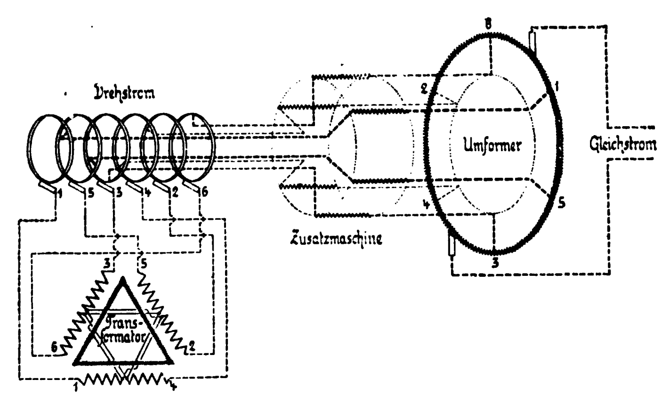


Fig. 269. Drehstromzusatzmaschine.

Außerdem ist mit dem Betrieb eines über- beziehungsweise untererregten Einmaschinenumformers beim Parallelarbeiten mit einer Batterie noch der große Nachteil der Betriebsunsicherheit verbunden, da bei einer Unterbrechung des zugeführten (Wechsel- beziehungsweise) Drehstromes am Umformer selbst je nach der Größe der Über- beziehungsweise Untererregung ein mehr oder weniger starker Kurzschluß auftritt.

Spannungsveränderungen, wie sie zum Laden von Akkumulatoren notwendig sind, können nur (abgesehen von der Aufstellung einer Zusatzmaschine auf der Gleichstromseite) durch einen Transformator mit veränderlichem Umsetzungsverhältnisse hervorgebracht werden oder aber durch die der A. E.-G. patentierte, auf derselben Welle sitzende Drehstromzusatzmaschine, Fig. 269, mittels welcher die Spannung des in den Anker eingeführten Drehstromes geändert wird, was dann eine entsprechende Spannungsänderung des Gleichstromes zur Folge hat. In diesem Falle hat also der Drehstrom-Gleichstromumformer

auf der Gleichstromseite, Fig. 270, den Kommutator und auf der Drehstromseite, Fig. 271, die Zusatzmaschine mit den Schleifringen.

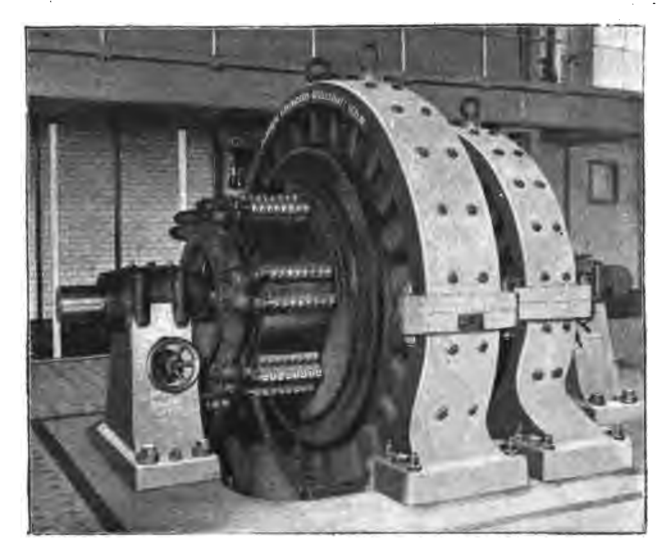


Fig. 270. Einmaschinenumformer. Gleichstromseite.

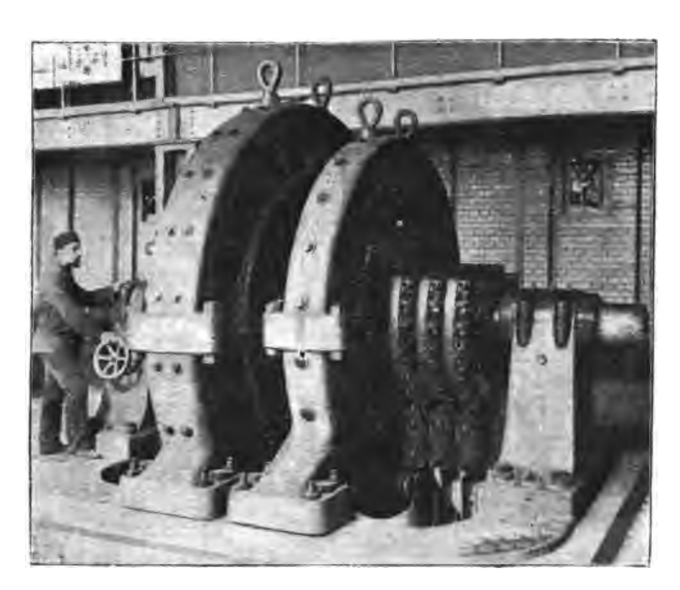
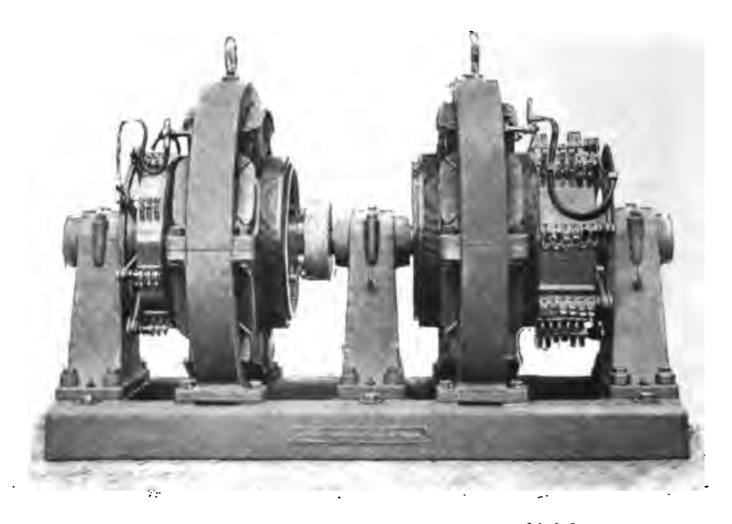


Fig. 271. Einmaschinenumformer. Drehstromseite.

Bei den Zweimaschinenumformern hat man gewöhnliche Gleichstrommaschinen, deren Spannung, wie allgemein üblich, mit Hülfe

des Nebenschlußregulators verändert werden kann. Der Maschinist hat sich dabei während des Betriebes lediglich um die Gleichstrommaschine zu kümmern. Er braucht von Parallelschaltung und von Regulierung des *cos* φ nichts zu verstehen; seine Drehstrommotorseite wird durch plötzliche Spannungs- oder Umdrehungsschwankungen der Hochspannungszentrale wesentlich weniger beeinflußt, wie bei den übrigen Systemen.

Auf entsprechende Weise kann man übrigens auch mittels Zweimaschinenumformern Gleichstrom der einen Spannung in solchen einer anderen Spannung umwandeln, Fig. 272.



272. Zweimaschinenumformer. Gleichstrom-Gleichstrom.

201. Transformatoren der Union-Elektrizitätsgesellschaft, Berlin. Übersicht.

1. Modell *H*, in gußeisernem Gehäuse eingeschlossen, mit Ölfüllung; in 16 Größen von 0·6 bis 50 Kilowatt.

2. Modell *A B*, genannt „Unterstationstransformatoren"; in gußeisernem Gehäuse durch künstlichen Luftzug zu kühlen; in 12 Größen von 50 bis 1000 Kilowatt.

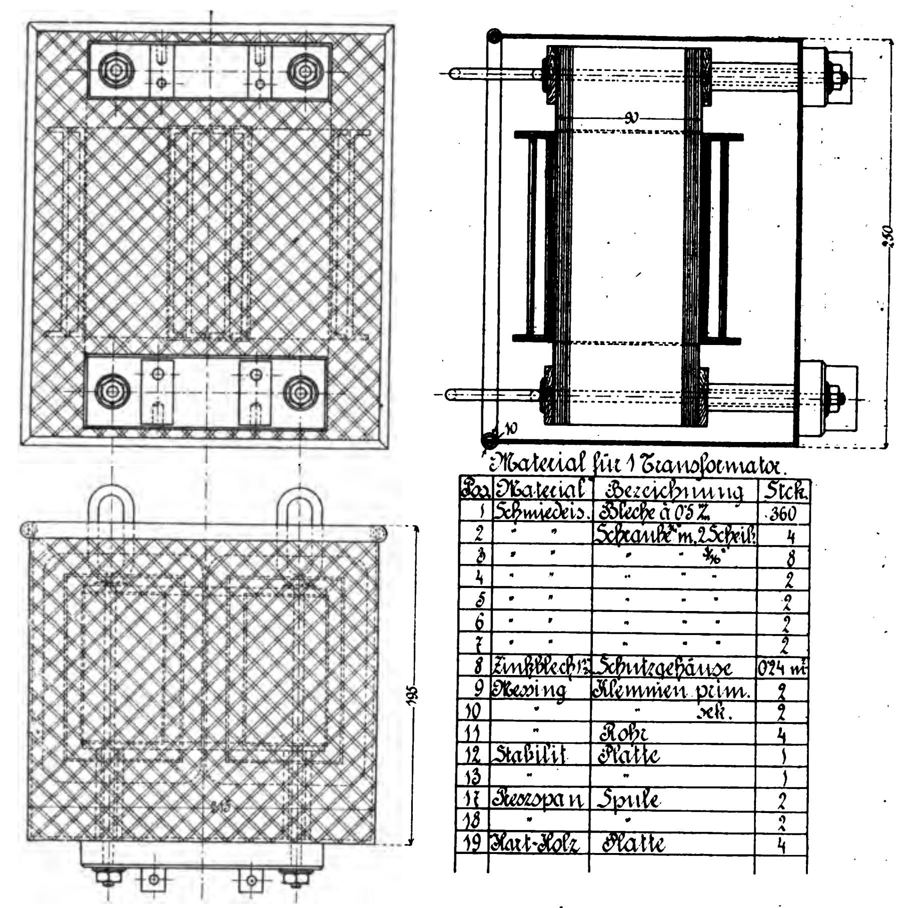
Wechselstrom-Gleichstromumformer.

Synchronmotordynamo bestehend aus einem Synchronmotor Modell *A T* oder *A S* und einer passenden Gleichstrommaschine Modell *M P* von 15 bis 500 Kilowatt.

Drehstrom-Gleichstromumformer Modell *I C* von 15 bis 200 Kilowatt mit gemeinsamer Ankerwicklung für beide Stromarten. Bequeme Regulierbarkeit der Gleichstromspannung vermittels Potentialregulatoren.

202. Transformatoren der Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vormals L. Schwarzkopff, Berlin.

Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom, bis 5000 Volt, 50 Perioden.



Material für 1 Transformator.

Pos.	Material	Bezeichnung	Stck.
1	Schmiedeis.	Bleche à 0·5 Z.	360
2	" "	Schraube m. 2 Scheib.	4
3	" "	" " 5/16"	8
4	" "	" " "	2
5	" "	" " "	2
6	" "	" " "	2
7	" "	" " "	2
8	Zinkblech 1/2	Schutzgehäuse	0·24 m²
9	Messing	Klemmen prim.	2
10	"	" sek.	2
11	"	Rohr	4
12	Stabilit	Platte	1
13	"	"	1
17	Pressspan	Spule	2
18	"	"	2
19	Hart-Holz	Platte	4

Fig. 273. Bogenlampentransformator.

Modell *T E* für Einphasenstrom, 15 Größen von 1 bis 100 Kilowatt.
Modell *T D* für Drehstrom, 18 Größen von 1 bis 200 Kilowatt.
Gleichstrom-Drehstromumformer.

Das Umformen des Stromes geschieht mit Benützung der Wechselstrommotoren Modell *M* und Gleichstromdynamos Modell *G*.

203. Transformatoren der Helios E.-A.-G. in Köln-Ehrenfeld: Fig. 273 zeigt einen Bogenlampentransformator zu 700 Watt, Type *W T b*. Maßstab: 1 : 2.

Bei einem Übersetzungsverhältnisse	1 : 1	beträgt der Wirkungsgrad	93%
„ „ „	3 : 4	„ „ „	91%
„ „ „	1 : 2	„ „ „	89%

Übersicht. Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom; stehendes Modell, bis 5000 Volt, 50 Perioden; Einphasenstrom 14 Größen, von 1 bis 25 Kilowatt, Dreiphasenstrom 500 Größen, von 1 bis 100 Kilowatt.

204. Transformatoren der Deutschen Elektrizitätswerke Garbe, Lahmeyer & Co., Aktiengesellschaft zu Aachen.

Modell *WT* für einphasigen Wechselstrom, regelrecht für 50 Perioden, Leistungen von 1 bis 150 Kilowatt, bis 15.000 Volt.

Modell *D T* für Drehstrom, regelrecht 50 Perioden, Leistungen von 1 bis 250 Kilowatt, bis 15.000 Volt.

Umformer. Übersicht.

Die Modelle *K*, *G*, *V P* und *A P* werden sowohl als Gleichstromumformer für verschiedene Spannungen als auch als Wechselstrom- beziehungsweise Drehstrom-Gleichstromumformer gebaut.

205. Der Gleichstromumsetzer von W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a. M. W. Lahmeyer[1]) hat zuerst Umsetzer mit zwei verschiedenen Wicklungen auf demselben Anker in die Praxis eingeführt.

Für Spannungen bis 600 Volt und kleinere Modelle werden Umsetzer mit Trommelanker gebaut; dann sind, wie es Fig. 274 zeigt, die beiden Ankerwicklungen übereinander gewickelt. Die Umsetzer größerer Modelle erhalten Grammeringe. Die Wicklungen sind dann nebeneinander, jede in einer besonderen Nut untergebracht. Die durch Fibre von den Nuten isolierte Wicklung erscheint einzeln zugänglich und auswechselbar.

Dynamo und Umsetzer gleicher Leistung haben auch gleiche Größe und gleichen Wirkungsgrad.

Der Umsetzer arbeitet bei gleicher Erregung mit höherer magnetischer Sättigung als die Dynamo, weil sich die Rückwirkungen der Ankerwicklungen gegenseitig aufheben. Damit sind zugleich die Ursachen, die eine Funkenbildung und Verschiebung der Bürsten bei veränderlichen Belastungen hervorbringen, ausgeschlossen. Die motorische Wicklung bedingt eine Bürstenverschiebung in der entgegengesetzten Richtung der Umdrehung, die sekundäre Wicklung dagegen eine Verschiebung in der Richtung der Umdrehung. Beide Wirkungen heben demnach einander auf.

[1]) Deutsches Reichspatent Nr. 52201.

Arbeiten Umsetzer und Sammler zusammen, dann erhält das Reguliergestell größere Abmessungen und außer der direkten noch eine Nebenschlußwicklung. Bei der Ladung wird durch das Einschalten beider Wicklungen die Bedarfspannung erzeugt. In Nebeneinanderschaltung wirkt nur die erstere. Das Umpolarisieren des Umsetzers ist ausgeschlossen, da die direkte Wicklung auf den Magnetismus des Hauptgestelles keinen Einfluß hat.

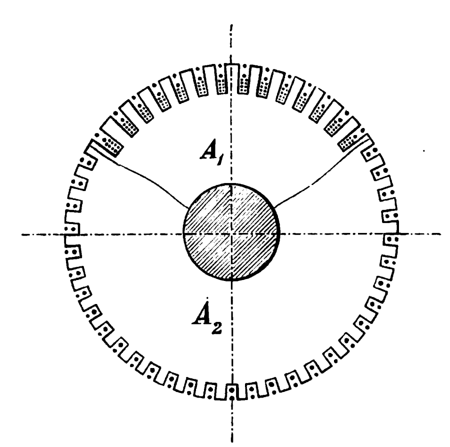


Fig. 274. Umsetzer.
Anordnung der Ankerwicklung.

Dieser Umsetzer gleicht auch den Spannungsverlust in einer zugehörigen Fernleitung aus und bildet so einen selbsttätigen Regulator des Lahmeyerschen Fernleitungssystemes.

Fig. 275 zeigt ein perspektivisches Bild dieses Umsetzers. Das Modell ist dasselbe, wie jenes der Lahmeyerschen Maschine und seiner Umsetzermotoren. Die letzteren haben im wesentlichen dieselbe Einrichtung wie der Umsetzer, finden jedoch zur gleichzeitigen Abgabe von Licht und Kraft Verwendung (Kraftlichtdynamo). Umsetzer und Umsetzermotor sind demnach Doppelspannungsmaschinen. Die Magneterregung der Doppelspannungsmaschinen erfolgt mittels des Niederspannungsstromes, so daß eine vollkommene Isolation sicher und billig erreicht ist. Wenn nun beim Anlaufen der Maschine kein Niederspannungsstrom aus einem Sammler oder einem Zentralnetz zur Verfügung steht, dann ist beim Einschalten derselben eine Hochspannungsmagneterregung erforderlich. Als solche findet eine unter der Nebenschlußwicklung liegende sogenannte Erregerwicklung von geringer Windungszahl Verwendung, welche ebenso wie die außerhalb der Maschine angeordneten Anlaßwiderstände in Hintereinander-

schaltung mit der Hochspannungsankerwicklung geschaltet ist und wie diese, wenn man ihrer nicht mehr bedarf, stufenweise abgeschaltet werden kann. Sobald dann die Erregerwicklung stromlos wird, d. h. sobald der Hochspannungsstrom nur mehr den Anker durchfließt, wird dieselbe durch einen vorher gesperrten Umschalter noch in den Niederspannungsnebenschlußstrom eingeschaltet.

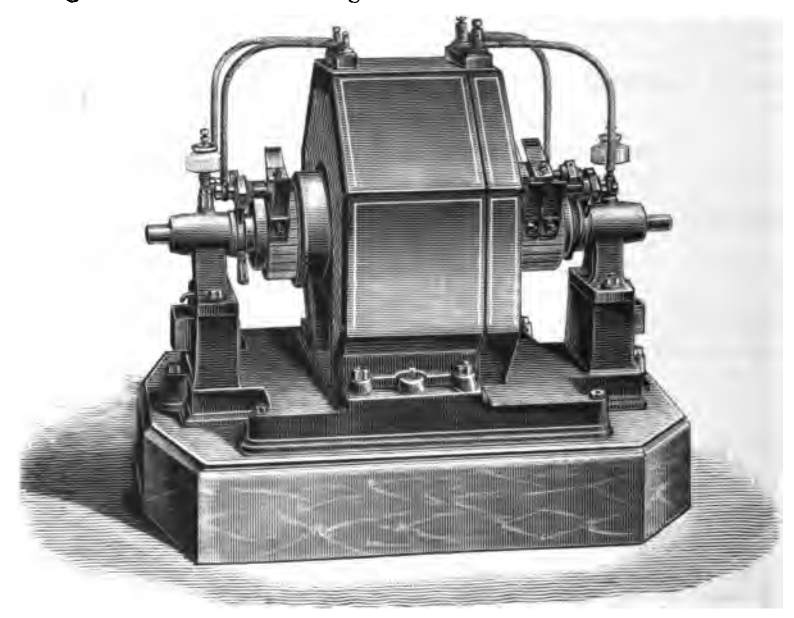


Fig. 275. Umsetzerdynamo.

Außer den Umsetzern mit gemeinsamem Anker baut obige Firma auch Motormaschinen.

Transformatoren. Übersicht.

Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom. Modell *K*, zwei oder drei Kerne (.˙.) stehend, bis 10.000 Volt, 50 Perioden, 17 Größen von 1 bis 200 Kilowatt. Die größeren Transformatoren mit Luftkühlung.

206. Transformatoren der Westinghouse E.-A.-G. in Berlin.[1])

OD-Transformatoren, Fig. 276 und 277. Wir geben hier eine Beschreibung einer neuen Klasse von Westinghouse-Transformatoren für Beleuchtung und Kraftübertragung. Die Modelle dieser Transformatoren und die dabei beobachteten Konstruktionsmethoden sind auf 15jähriger Erfahrung in der Fabrikation von Transformatoren begrün-

[1]) Mit Benützung einer Druckschrift, welche mir von dieser Firma für diesen Zweck zur Verfügung gestellt wurde.

det. Beim Ausarbeiten der Modelle wird die größte Sorgfalt angewendet und die Fabrikation wird durch besonders geschulte Arbeiter besorgt.

Tabelle.

Angaben	Dynamo D. III.	Umsetzer U. VI.			Umsetzer-Motor Z. II.		
		Hochspannung	Niederspannung	Hoch- u. Niederspannung	Hochspannung	Niederspannung	Hoch- u. Niederspannung
Gewicht der Maschine in *kg*	8000	—	—	3500	—	—	4500
Maximale Leistung in *KW*	80	—	44	—	—	7·5	—
„ „ in *HP*	—	—	—	—	70	—	—
Kommerzieller Nutzeffekt in %	92	—	—	86	—	—	88
Klemmenspannung in Volt	660	660	110	—	660	110	—
Höhe der Maschine mit Grundplatte in *mm*	1393	—	—	1113	—	—	1223
Höhe und Breite des Magnetgestelles in *mm*	1278	—	—	1046	—	—	1108
Tiefe des Magnetgestelles in *mm*	640	—	—	500	—	—	530
Jochquerschnitt in m^2	736	—	—	325	—	—	—
Schenkelquerschnitt in *cm*	1210	—	—	346	—	—	—
Schenkelmaterial. Eisen	Guß-	—	—	Schmiede-	—	—	Guß-
Polschuh-Fläche in cm^2	—	—	—	1108	—	—	—
Bohrung in *mm*	608	—	—	522	—	—	508
Ankerdurchmesser in *mm*	600	—	—	500	—	—	500
Ankerbreite in *mm*	440	—	—	375	—	—	350
Anzahl der Lager	3	—	—	2	—	—	2
Wellendurchmesser in *mm*	120	—	—	75	—	—	85
Wellendurchmesser (äußeres Lager) *mm*	100	—	—	—	—	—	—
Tourenzahl	350	—	—	650	—	—	530
Anzahl der Ankernuten	111	—	—	69	—	—	105
Anzahl der Kollektorteile	111	69	47	—	—	105	53
Kollektormaterial. Bronze	—	—	—	—	—	—	—
Kollektordurchmesser in *mm*	500	200	280	—	400	250	—
Kollektorlänge in *mm*	200	100	200	—	150	100	—
Bürstenanzahl (nebeneinander)	4	2	4	—	3	2	—
Abstand der zwei Bürstengrup. 90°	—	—	—	—	—	—	—
Ankerdraht-Gewicht (mit Isolation) in *kg*	101	95	43	—	52	7	—
Ankerdraht-Querschnitt im mm^2	15·9	19·6	47·7	—	8·6	7	—
Ankerdraht-Widerstand in Ohm	0·185	0·101	0·0068	—	0·053	0·25	—
Schenkeldraht-Gewicht (mit Isolation) in *kg*	576	11	238	—	29	320	—
Schenkeldraht-Querschnitt in mm^2	10·2	7	5·3	—	12·6	7	—
Schenkeldraht-Widerstand in Ohm	9·36	0 4	15·6	—	0·4	11·8	—
Windungen für 1 Schenkel	840	51	1150	—	52	864	—
Schleifring Nr. 1 verbunden mit Lamelle	—	—	1	—	—	—	—
Schleifring Nr. 2 verbunden mit Lamelle	—	—	7	—	—	—	—
Schleifring Nr. 3 verbunden mit Lamelle	—	—	13	—	—	—	—
Bürstenmaterial: Kupfergaze.							

Sämtliche Spulen sind nach genauen Dimensionen gewickelt und alle Isolierungen nach Maß geschnitten, so daß die verschiedenen Teile

aller Transformatoren derselben Größe identisch sind und untereinander ausgewechselt werden können.

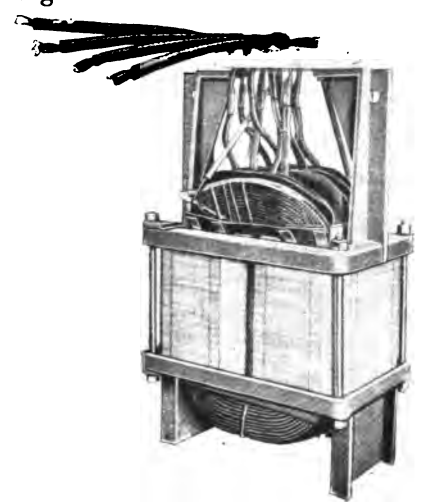


Fig. 276. 30 *KW OD*-Transformator ohne Gehäuse.



Fig. 277. Herausnehmen eines Transformators aus dem Gehäuse.

Viele Spezialwerkzeuge werden für diese Arbeit verwendet.

Allgemeines. Im Laufe der Zeit sind verschiedentliche Verbesserungen vorgenommen worden, dieselben bezogen sich jedoch nur auf kleine Anderungen an Einzelteilen, welche sich infolge der Anforderungen von Theorie und Praxis als wünschenswert herausgestellt haben. Im allgemeinen stellt somit die als *OD*-Type bekannte neue Klasse von Transformatoren keine wesentliche Abweichung von der Normaltype dar, schließt aber unter Beibehaltung der vielen vorteilhaften Eigenschaften der früheren Modelle eine Anzahl neuer und wertvoller besonderer Vorzüge in sich.

Bei dem Bau dieser Transformatoren wurden insbesondere in Erwägung gezogen: Wirkungsgrad, sowohl für die Tages- wie für volle Belastungsregulierung, sowohl für Glühlampen als auch für Bogenlampen, Motoren oder andere induktive Belastungen, Isolation sowohl für normalen Betrieb als auch für außerordentliche Beanspruchung infolge von

Blitzschlag; überdies wurde einfacher Aufbau, Bequemlichkeit in der Handhabung und Zuverlässigkeit zur Grundbedingung für den Entwurf dieser Transformatoren gemacht.[1])

Ölisolation. Die rasche Ausbreitung des Wechselstrommotors und die zunehmende Verbreitung der mittelbaren Stromverteilungssysteme hat einen Bedarf nach Transformatoren von großen Abmessungen geschaffen, welche beständig unter Vollast betrieben werden können. Diese neuen Ansprüche haben Probleme mit sich gebracht, die für den Bau der kleinen Transformatoren und Vorrichtungen, welche für unterbrochenen Dienst, wie z. B. Beleuchtung von Privatwohnungen, bestimmt waren, nicht in Frage kamen.

Das Öl hat besondere Vorteile für Kühlzwecke, erhöht die Dauerhaftigkeit der Isolation und vermehrt die Widerstandskraft des Transformators gegen Blitzschläge. Die *OD*-Transformatoren wurden deshalb für Ölbad eingerichtet. In Berücksichtigung der Zweckmäßigkeit kleiner trockener Transformatoren für gewisse Arbeitsleistungen wurden indes die *OD*-Transformatoren von $^1/_4$ bis zu einschließlich 25 Kilowatt so gebaut, daß sie auch ohne Öl in vollkommen befriedigender Weise betrieben werden können, vorausgesetzt, daß die Belastung die üblich unterbrochene ist. Der Gebrauch des Öles wird empfohlen, wo es nur immer angeht.

Spannungen. Die Bewicklungsart für zwei primäre und zwei sekundäre Spannungen, welche zuerst bei den *CS*-Transformatoren eingeführt wurde, hat sich sehr vorteilhaft bewährt und ist nun von beinahe allen Transformatorenfabriken angenommen worden. Die günstige Aufnahme dieser Besonderheit brachte die Möglichkeit eines noch größeren Spannungsbereiches und dies ist in den *OD*-Transformatoren durch Bewicklung für zwei primäre und drei sekundäre Spannungen durchgeführt.

Transformatoren bis zu einschließlich der 3 Kilowatt Größe werden für primär 1050 und 2100 Volt und sekundär $52^1/_2$, 105 und 210 Volt bewickelt, die größeren Typen werden für dieselben primären Spannungen und mit sekundären Spulen für $52^1/_2$, 105 und 210 Volt oder für 105, 210 und 420 Volt versehen. Die Transformatoren, welche sekundäre Spannungen von $52^1/_2$, 105 und 210 Volt besitzen, werden unter dem Namen Beleuchtungstransformatoren geführt, diejenigen von 105, 210 und 420 Volt werden als Krafttransformatoren bezeichnet.

Viele Zentralstationen, welche gegenwärtig $52^1/_2$ und 105 Volt für Beleuchtung liefern, beabsichtigen ein Dreileitersystem mit 210 Volt

[1]) Josef Kareis: Zeitschrift für Elektrotechnik, 1901, S. 17 ff.

zwischen den äußeren Leitern auf wenigstens einer ihrer Leitungen einzuführen. Die *OD*-Transformatoren, welche für $52^1/_2$, 105 und 210 Volt bewickelt sind, können in den gegenwärtigen Netzen zur Umformung auf $52^1/_2$ oder 105 Volt gebraucht werden, während ein einfacher Wechsel in den sekundären Verbindungen genügt, um den Transformator der zukünftigen höheren Spannung anzupassen. Bei einem Transformator, der für eine sekundäre *EMK* von nur $52^1/_2$ und 105 Volt bewickelt ist, würde es hingegen nötig sein, die Transformatoren umzukonstruieren oder neue anzuschaffen, um 200 Volt zu erreichen.

Viele Stationen arbeiten jetzt mit $52^1/_2$ und 105 Volt Zweileitersystemen für Beleuchtung und mit 210 Volt Dreiphasensystem für Motorenbetrieb. Andere arbeiten mit 105 und 210 Volt für Beleuchtung und mit 420 Volt für Motoren. Unter diesen Umständen leuchtet der Vorteil eines Transformators, der auf verschiedene Spannungen geschaltet werden kann, ohneweiters ein, da dies die Anpassungsfähigkeit des Systems vergrößert und die Anzahl der auf Lager zu haltenden Transformatoren herabmindert.

Die für die *OD*-Transformatoren angegebenen Normalspannungen sind $5^0/_0$ höher als diejenigen der *CS*-Transformatoren, die Übersetzungsverhältnisse bleiben jedoch die gleichen. Die *OD*-Transformatoren können also auch für Spannungen von 2000 oder 1000 Volt verwendet werden, um dann 50, 100, 200 oder 400 Volt je nach Bewicklung und Verbindnng abzugeben.

Die *OD*-Transformatoren sind so gebaut, daß sie primär für Spannungen von 1100 Volt bis 1150 oder von 2000 bis 2300 verwendet werden können.

Die Klemmen. Die Klemmen für die vier primären und die acht sekundären Leitungen sind auf einem Porzellanblock angebracht.

Die Umschaltungen der primären Windungen werden mittels Schrauben und Metallverbindungen bewirkt, so daß nur geringe Zeit nötig ist, um z. B. von der Serien- zur Parallelschaltung überzugehen. Dieser Vorzug wird insbesondere von den Betriebsleitern gewürdigt werden, welche gezwungen waren, ihre Transformatoren von 1000 auf 2000 Volt einzurichten. Die frühere Ausführung mit gelöteten Verbindungen erforderte eine geraume Zeit und erheischte die Beschäftigung von einer verhältnismäßig großen Anzahl von Arbeitern, wenn, wie dies gewöhnlich der Fall war, eine große Anzahl von Transformatoren in einem Tage umgewechselt werden mußten.

Die Kombinationen auf der sekundären Seite werden sämtlich mittels gelöteter Verbindungen durchgeführt.

Die starken Ströme, welche diese Bewicklung führt, machen die

gelötete Verbindung wünschenswerter als eine Schraubenverbindung und außerdem ist gewöhnlich für die Umänderung in der sekundären Schaltung mehr Zeit verfügbar als zum Auswechseln der primären Verbindungen.

Um zu verhüten, daß die Isolation an den Zuführungsleitungen als Docht wirke und das Öl aus dem Gehäuse absauge, sind die Drähte gerade unterhalb des Klemmenblockes frei von Isolation.

Die Verbindungsmethode für die verschiedenen primären und sekundären Spannungen ist auf einem Zettel, welcher jedem Transformator angehängt wird, ebenso wie auf dem Klebezettel im Innern eines jeden Gehäusedeckels vermerkt.

Einzelne Spulen. Die Spulen werden einzeln gewickelt und einzeln isoliert, wodurch die Gefahr der Berührung durch den bei der Wicklung von Spulen auf derselben Schablone verursachten außergewöhnlichen Druck auf die Isolation vermieden wird.

Parallele Spulen. Die Spulen sind von gleicher Form und werden nebeneinander gereiht, um die Inanspruchnahme der Spulen oder der Isolation zwischen denselben zu vermeiden.

Primäre Bewicklung. Die primären Spulen werden in vielen Lagen mit wenig Windungen in einer Lage gewickelt. Dadurch wird die *EMK* so unterteilt, daß nur ein geringer Spannungsunterschied zwischen aufeinander folgenden Lagen besteht.

Sekundäre Bewicklungen. Die sekundären Spulen sind aus viereckigem Drahte in einer Weise gewickelt, welche die gewöhnliche Kreuzung der Drähte an den Enden der Lagen und die dadurch entstehende Gefahr, daß die Isolation an solchen Stellen durchschnitten wird, vermeidet. Durch den viereckigen Querschnitt wird erreicht, daß der Kupferquerschnitt bei derselben Raumausnützung etwa um 30% reichlicher genommen werden kann als bei rundem Draht. Der Widerstand wird entsprechend verkleinert und die Leistungsfähigkeit des Transformators vermehrt.

Ventilation. Ein großer Teil der Transformatorenspulen ragt aus dem Eisenkern heraus. Die Enden der äußeren Spulen der größeren Nummern werden auseinandergebogen und gestatten somit der Luft und dem Öl freien Zutritt. Ein Transformator mit ausgebreiteten Spulen hat eine größere Abkühlungsfläche als ein solcher mit festen Spulen. In den auf diese Weise ausgebreiteten Spulen hat die Wärme von einem Leiter bis zu einer Abkühlungsoberfläche nur kurze Entfernung zurückzulegen.

Diese Methode der Ausbreitung der Spulen verbürgt eine bessere Wärmeabführung. Um eine angehend niedrige Temperatur in den Trans-

formatoren zu erhalten, wird sonst entweder viel mehr Material verwendet oder die wirksamste Form geopfert, um eine größere ausstrahlende Fläche zu erhalten.

Das Gehäuse. Transformatoren bis einschließlich 10 Kilowatt werden in gußeiserne Gehäuse gestellt. Für die größeren Nummern werden Gehäuse verwendet, deren Seiten aus schwerem Eisenwellblech hergestellt sind und deren Deckel und Boden aus Gußeisen bestehen. Die Wellbleche der größeren Gehäuse bieten eine große strahlende Oberfläche, wodurch die Erwärmung des Transformators vermindert wird. Außerdem ist das Gewicht solcher Gehäuse weit geringer als das eines gußeisernen von derselben Größe. Sämtliche Transformatorengrößen sind für die Anbringung im Freien geeignet, da der Bau der Gehäuse vollen Schutz gegen die Witterung gewährt.

Mit allen Transformatoren bis zu 25 Kilowatt werden besondere Eisenstangen zum Herausnehmen derselben aus dem Gehäuse geliefert.

Isolation. Bei den *OD*-Transformatoren findet nur das allerbeste Isolationsmaterial Verwendung. Das Rohmaterial wird einer besonderen Behandlung unterworfen, um dadurch seine isolierenden Eigenschaften und mechanische Stärke weitgehendst zu steigern und dasselbe für alle praktische Zwecke wasserdicht zu machen. Vor dem Isolieren behandelt man die Transformatorenspulen auf dieselbe Weise, so daß sie auch für praktische Zwecke vollkommen wasserdicht sind.

Prüfungen. Die *OD*-Transformatoren werden einer Prüfung unterzogen, um irgend welche der Form oder Konstruktion anhaftende Fehler herauszufinden und dieselben abzustellen. Es wurde deshalb eine vollständige Reihe von Transformatoren gebaut und sorgfältige Messungen der Verluste und des Isolationswiderstandes vorgenommen. Sodann wurden die Transformatoren beinahe ein ganzes Jahr hindurch mit der doppelten Spannung betrieben. Am Ende dieser Periode fand eine Messung der Eisenverluste in den verschiedenen Transformatoren statt. In den magnetischen Eigenschaften des Eisens war keine bemerkenswerte Verschlechterung eingetreten. Die Isolation wurde alsdann den schwersten Proben unterworfen und die Transformatoren für kurze Zeit, ohne Schaden zu nehmen, mit sechs- bis achtfachen Spannungen betrieben. Schließlich fand man, daß diese Transformatoren eine Spannung von 20.000 Volt aushalten können.

Jeder Transformator wird, bevor er die Fabrik verläßt, den folgenden Versuchen unterzogen.

1. Prüfung auf Überlastung bei Normalspannung.
2. Prüfung bei dreifacher Spannung ohne Belastung.

3. Isolationsprobe von 8000 Volt zwischen primär und sekundär.
Isolationsprobe von 6000 Volt zwischen primär und Eisen.
Isolationsprobe von 4000 Volt zwischen secundär und Eisen.

Gleichfalls werden sorgfältige Messungen des Eisenverlustes und des Verhältnisses der Bewicklungen vorgenommen.

Sämtliche Versuche finden ohne Öl statt. Mit Öl können die Versuche strenger durchgeführt werden.

Wechselzahl. Die *OD*-Transformatoren können in Stromkreisen für irgend welche Periodenzahl (50 bis 133 per Sekunde) Anwendung finden. Je kleiner die Wechselzahl ist, desto geringer wird der Eisenverlust sein, und da der Kupferverlust eigentlich bei allen Wechseln derselbe ist, so wird das Güteverhältnis in dem Maße erhöht, als die Wechselzahl vermindert wird. Die Regulierungsfähigkeit verändert sich nur wenig mit Änderungen der Wechselzahl, gestaltet sich aber bei niedrigen Wechseln ein wenig günstiger.

Größenverhältnisse, Gewichte u. s. w. Die folgende Tafel enthält eine Liste der verschiedenen Größen der *OD*-Transformatoren sowie deren Gewichte und die sekundären Spannungen, für welche sie gewickelt sind. Die primären Spulen aller Größen sind für 1050 und 2100 Volt bestimmt. Die $6^1/_4$ und $12^1/_2$ Kilowatt-Größen, welche von der Type *CS* hergestellt wurden, sind in diese Liste nicht aufgenommen, ebenso ist statt $18^3/_4$ Kilowatt, 20 Kilowatt eingeführt. Die Liste wurde durch Hinzufügung von 30, $37^1/_2$ und 50 Kilowatt-Transformatoren vermehrt.

Größe Kilowatt	Sekundäre Spannung Beleuchtung	Kraft	Gewicht in Kilogramm Netto	Brutto	Liter Öl
$^1/_4$	$52^1/_2$—105—210	.....	25	34	5
$^1/_2$	„	.....	33	42	5
1	„	.....	57	76	9
$1^1/_2$	„	.....	63	77	9
2	„	.....	66	82	9
3	„	.....	88	110	14
4	„	105-210-420	105	130	20
5	„	„	160	200	18
7·5	„	„	225	285	34
10	„	„	235	295	32
15	„	„	340	430	82
20	„	„	430	540	123
25	„	„	480	610	118
30	.....	„	510	660	159
$37^1/_2$	.....	„	550	710	154
50	.....	„	645	815	182

Spezielle *OD*-Transformatoren. Der *OD*-Transformator kann für irgend eine *EMK* bis zu 6600 Volt bewickelt werden. Er kann für das Scottsche System (Dreiphasen-Zweiphasen-Transformation) eingerichtet werden, er kann für 3000 Wechsel bewickelt und fast jeder besonderen Arbeit, welche von Transformatoren verlangt wird, angepaßt werden. Für größere Leistungen und höhere Spannungen findet eine isolierte selbstkühlende Type Verwendung.



Fig. 278.
500 *KW*-30.000 Volt-Transformator.

Transformatoren mit Selbstkühlung, Fig. 278 und 279.

Die rasche Entwicklung, welche die elektrische Kraftübertragung für weite Entfernungen nahm, wurde größtenteils durch die Vervollkommnung des Mehrphasenmotors und des Wechselstromtransformators ermöglicht. Dabei zeigte sich im allgemeinen eine stete Zunahme sowohl der zu übertragenden Kraft selbst als auch der Entfernung, aur welche die Übertragung ausgeführt wurde. Der erstere Umstand führte zur Herstellung von immer größeren Stromerzeugungsmaschinen und Transformatoren, während der letztere die Verwendung immer höherer Betriebsspannungen verursachte. So entstanden besondere Normaltransformatoren von 10 bis 500 Kilowatt Leistung.

Bau. Die allgemeine Form der kleinen Typen wurde auch für die größeren Typen im allgemeinen beibehalten.

Wicklung. Sowohl die Hochspannungs- wie auch die Niederspannungswicklung ist in mehrere flache Spulen unterteilt, welche mit vielen Lagen und wenig Windungen in einer Lage gewickelt sind und von denen jede Spule besonders isoliert ist.

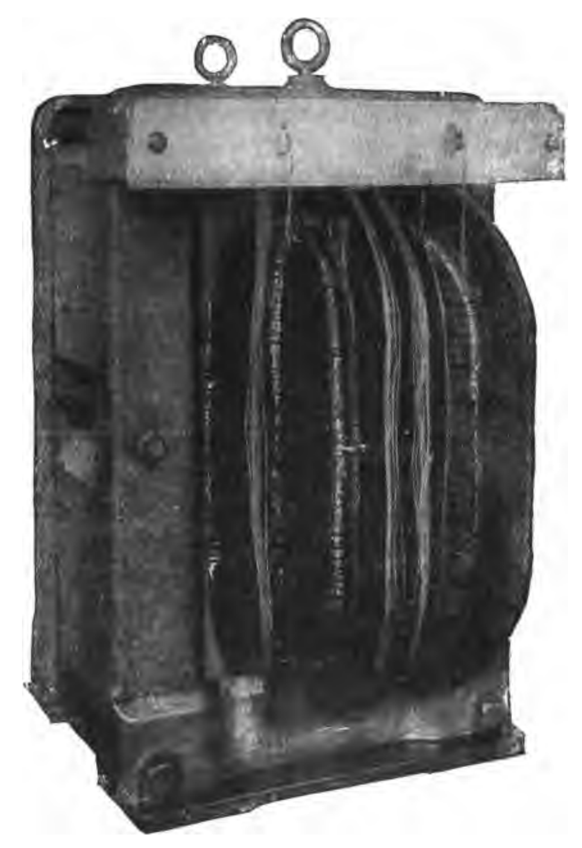


Fig. 279. 150 *KW*-30.000 Volt-Transformator.

Die Vorteile dieser Bauart sind:

1. Die gesamte *EMK* wird auf mehrere Spulen verteilt, wodurch sich die Belastung innerhalb einer jeden einzelnen Spule im Verhältnis vermindert.

2. Die *EMK* in jeder einzelnen Spule wird auf viele Lagen verteilt, wodurch die Spannung zwischen anliegenden Lagen kleiner wird.

3. Die Spulen können an den Enden auseinandergebreitet werden, so daß das Öl eine verhältnismäßig große Oberfläche besitzt, wodurch sowohl für eine bessere Abkühlung als auch für eine gute Isolation gesorgt ist.

4. Die Regulierung des Transformators wird bedeutend verbessert.

5. Die Wicklungen können in Reihe oder parallel geschaltet werden, so daß der Transformator für verschiedene Spannungen verwendbar ist.

6. Im Falle eine der Spulen beschädigt würde, kann an Ort und Stelle leicht eine andere, auch von nicht besonders geschulten Arbeitern, dafür eingelegt werden.

Die Klemmen. Die Hochspannungsklemmen sind auf einer Marmorplatte an der einen Seite des Transformators angebracht. Die Niederspannungsklemmen befinden sich auf der entgegengesetzten Seite an einem eisernen Träger, welcher bestens mit Glimmer isoliert ist.

Ölisolation. In dem Maße, als die Vorteile des Öles als ein Isolator für hohe Spannungen klarer erkannt wurden, kam auch dessen Anwendung für Transformatoren von sehr hoher Spannung immer mehr in Aufnahme. Außer seinen hohen isolierenden Eigenschaften ist das Öl als guter Wärmeleiter wertvoll für die Kühlung. Heute ist infolgedessen die Anwendung des Öles für große Typen, die mit hoher Spannung betrieben werden, allgemein üblich.

Wirkungsgrad. Bei dem Bau dieser Transformatoren wurde dem Wirkungsgrad besondere Sorgfalt zugewendet und der Materialaufwand von Eisen und Kupfer in einem derartigen Verhältnis gewählt, daß die Gesamtverluste am kleinsten werden. Die Verluste in einem Transformator sind nämlich zweierlei Art: einmal der Eisenverlust (Hysteresis) infolge der periodischen magnetischen Veränderungen im Eisen, sodann der Kupferverlust (Joulescher Effekt), welcher durch den die Drähte durchfließenden Strom entsteht. Der Eisenverlust, welcher bei allen Belastungen eigentlich gleich bleibt, muß sehr niedrig gehalten werden, wenn ein hoher Wirkungsgrad auch bei kleinen Belastungen erreicht werden soll.

Es genügt jedoch nicht, daß der Verlust in einem Transformator bei seiner ersten Aufstellung sich als niedrig erweist, weil, wie man heute allgemein weiß, während der Betriebszeit das Eisen in seinen magnetischen Eigenschaften sich wesentlich verschlechtern kann, wodurch sich nach einiger Zeit eine entsprechende Erhöhung des Eisenverlustes herausstellt. Die Verlustzunahme beträgt z. B. in einigen Fällen das Doppelte des Anfänglichen. Es wird deshalb ein eigenes Verfahren bei der Herstellung und Behandlung des Transformatoreneisens angewendet. Auf diese Weise gelang es, ein Eisen herzustellen, welches seine magnetischen Eigenschaften im Betriebe nicht verschlechtert, so daß die Transformatoren auch nach langjährigem Betriebe keine Zunahme des Eisenverlustes zeigen.

Spannungsabfall.[1]) Einen möglichst geringen Spannungsabfall im Transformator für die verschiedenen Belastungen zu erreichen, ist im allgemeinen für größere Transformatoren noch wichtiger als für die kleinen Typen, und zwar deshalb, weil bei Verwendung der ersteren zunächst gewöhnlich zwei Transformatoren nötig sind, von denen der eine die Erhöhung, der andere die Reduzierung der Spannung besorgt, so daß der Spannungsabfall zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsstelle zweimal vorkommt, und weil ferner für die großen Transformatoren meist Belastung mit Motoren, also induktive Belastung in Frage kommt.

Die Kühlung. Die in einem Transformator entwickelte Wärme hängt von der Leistung und dem Wirkungsgrad des Transformators ab. In einem 500 Kilowatt-Transformator von 98·5% Nutzeffekt beträgt der Verlust 7·5 Kilowatt oder 10 *PS*. Da sich nun dieser ganze Verlust als Wärme äußert, muß für richtige und dauernde Abführung dieser Wärme gesorgt werden, weil sonst die Temperatur im Transformator zu einer gefährlichen Höhe ansteigen würde.

Als die ersten Transformatoren großer Leistung hergestellt wurden, hielt man es für notwendig, die Abkühlung durch künstliche Mittel zu bewirken. Die von der obigen Firma für alle Größen über 50 Kilowatt angenommene Methode bestand darin, den Transformator in ein Ölbad zu stellen und das Öl durch Zufluß von Wasser abzukühlen. Diese Methode wird noch immer bei Transformatoren von mehr als 500 Kilowatt verwendet. Selbstredend ist eine Anordnung, bei der selbsttätige Abkühlung erreicht wird, im Betriebe bequemer.

Diese Erkenntnis veranlaßte die Einführung einer Klasse von Transformatoren mit Selbstkühlung von 10 bis 100 Kilowatt. Die Transformatoren wurden in gußeiserne mit Öl angefüllte Behälter gestellt, deren gerippte Außenwände der Luft eine große Oberfläche boten und so die in dem Transformator entwickelte Wärme an die Außenluft abführten, das Öl wirkte dabei als Leiter für die Übertragung der Wärme vom Transformator an das Gehäuse.

Transformatoren dieser Type sind seit einer Reihe von Jahren in Gebrauch. Jedoch wurde bei ungefähr 100 Kilowatt die Grenze für gußeiserne Gehäuse erreicht, so daß, um dem zunehmenden Bedarf für größere Transformatoren zu genügen, eine neue Type selbstkühlender Behälter entworfen werden mußte. Diese neue Type von Behältern ist seit 1897 in Größen, welche von 100 bis 500 Kilowatt ansteigen, in Gebrauch. Sie ermöglichen nicht nur den Bau von selbstkühlenden Transformatoren, welche eine größere Leistung besitzen, als je zuvor

[1]) O. S. Bragstad: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 821.
Breslauer: Max, Zeitschrift für Elektrotechnik, 1902, S. 523.



angestrebt werden konnte, sondern gewährt auch noch viele weitere Vorteile über alle anderen bis jetzt entworfenen Behälterformen.

Die neue Gehäusetype besteht aus Eisenblechwandungen, welche von einem Winkeleisenrahmen zusammengehalten und getragen werden.

Das Eisenblech der Wandungen ist gewellt, wodurch die der Luft ausgesetzte Oberfläche beträchtlich größer wird und eine größere Wärmemenge auszustrahlen im stande ist.

Die Spannung. Die Transformatoren verschiedener Größen werden für jegliche gebräuchliche Spannung gebaut. Die Mehrzahl der Betriebe arbeitet heute mit 10.000 oder 15.000 Volt; eine kleinere Anzahl von Anlagen, welche besonders große Kraftmengen zu übertragen haben, verwenden jedoch diese Transformatoren auch für Spannungen von 20.000, 25.000 und 30.000 Volt. Die Firma hat Transformatoren für besondere Anlagen oder für Probezwecke bis zu Spannungen von 100.000 Volt gebaut. Diese Transformatoren werden gewöhnlich derart gewickelt, daß eine Veränderung des Spannungsverhältnisses möglich ist; hiedurch werden die Transformatoren anpassungsfähiger und für die verschiedensten Zwecke verwendbar.

Zweiphasen-Dreiphasen-Transformatoren. Transformatoren dieser Type dienen dazu, Zweiphasenstrom in Dreiphasenstrom oder umgekehrt zu verwandeln. Ein Paar solcher Transformatoren kann z. B. in einer mit einem Zweiphasenstromerzeuger versehenen Station verwendet werden, um auf eine hohe Spannung für eine Dreiphasenleitung zu transformieren. Für die Übertragung auf große Entfernungen ist nämlich bei dem Dreiphasensystem ein bedeutend geringerer Kupferaufwand nötig wie bei anderen Systemen. An der Verbrauchsstelle wird dann die Spannung durch zwei entsprechend geschaltete Transformatoren derart umgeformt, daß für die Verteilung ein niedrig gespanntes Zweiphasensystem entsteht. Obgleich die Transformatoren in jedem Paare ein wenig verschiedene Wicklungen erfordern, werden sie einander doch ähnlich gemacht, mit einer genügenden Anzahl von Klemmen zur Erzielung der richtigen *EMK* für die eine oder andere Lage im Paare.

Transformatoren für rotierende Umformer (Fig. 280). Wo rotierende Umformer angewendet werden, ist es oft notwendig, die *EMK* des Gleichstromes in weiten Grenzen zu verändern. Diese Veränderung wird gewöhnlich durch eine entsprechende Veränderung in der *EMK* des zugeführten Wechselstromes erreicht. Für solche Fälle werden Transformatoren gebaut, bei welchen das Verhältnis von primären zu sekundären Windungen in gewissen Grenzen einstellbar ist. Dies wird durch Zusatzwindungen erreicht, welche mit

Transformatoren mit Selbstkühlung.

50 Perioden. Gewichte und Größenverhältnisse.

Kilowatt	Volt	Gewicht: Transformator	Gewicht: Gehäuse	Gewicht: Öl	Gewicht: Gesamtgewicht	Größenverhältnisse: Fußbodenraum	Größenverhältnisse: Höhe
10	2000	114	114	95	323	635 × 483	864
	10000	136	114	93	343	635 × 483	864
	15000	159	147	145	442	711 × 508	914
	20000	227	215	190	632	940 × 584	1523
	30000	272	215	186	673	940 × 584	1523
15	2000	147	114	95	345	635 × 483	864
	10000	181	147	102	476	711 × 508	914
	15000	227	147	141	514	711 × 508	914
	20000	272	215	186	673	940 × 584	1523
	30000	363	215	177	755	940 × 584	1523
25	2000	204	145	147	496	711 × 508	914
	10000	227	147	163	537	838 × 559	914
	15000	249	215	190	655	940 × 584	1015
	20000	317	215	181	714	940 × 584	1523
	30000	408	215	170	793	940 × 584	1523
37·5	2000	238	147	163	549	838 × 559	914
	10000	295	215	181	691	940 × 584	1015
	15000	329	215	181	725	940 × 584	1015
	20000	408	215	172	795	940 × 584	1523
	30000	499	283	272	1076	965 × 737	1777
50	2000	317	215	181	714	940 × 584	1015
	10000	363	215	181	759	940 × 584	1015
	15000	385	215	175	775	940 × 584	1015
	20000	499	283	272	1079	965 × 737	1777
	30000	589	317	317	1224	965 × 737	1777
75	2000	385	283	272	941	965 × 737	1269
	10000	453	283	458	995	965 × 737	1269
	15000	544	283	249	1077	965 × 737	1269
	20000	589	725	408	1723	1269 × 965	1777
	30000	634	725	634	1832	1269 × 965	1777
100	2000	611	725	408	1746	1269 × 965	1269
	10000	680	725	397	1802	1269 × 965	1269
	15000	771	725	385	1882	1269 × 965	1269
	20000	907	725	611	2244	1269 × 965	1827
	30000	998	725	599	2324	1269 × 965	1827
125	2000	680	725	397	1702	1295 × 965	1270
	10000	771	725	626	2122	1295 × 965	1321
	15000	816	725	621	2163	1295 × 965	1321
	20000	952	725	608	2285	1295 × 965	1829
	30000	1088	725	589	2403	1295 × 965	1829
150	2000	771	725	626	2122	1295 × 965	1321
	10000	907	725	816	2244	1295 × 965	1321
	15000	1043	725	612	2367	1295 × 965	1321
	20000	1179	907	759	2845	1295 × 965	1930
	30000	1270	907	767	2913	1295 × 965	1930
200	2000	907	907	784	2598	1320 × 1067	1422
	10000	1043	907	771	2720	1320 × 1067	1422
	15000	1133	907	762	2802	1320 × 1067	1422
	20000	1224	907	757	2888	1320 × 1067	1930
	30000	1360	998	952	3310	1499 × 1143	2032

Kilowatt	Volt	Gewicht				Größenverhältnisse	
		Transformator	Gehäuse	Öl	Gesamtgewicht	Fußbodenraum	Höhe
250	2000	1043	907	771	2720	1320 × 1067	1422
	10000	1179	907	753	2838	1320 × 1067	1422
	15000	1224	998	966	3188	1499 × 1143	1524
	20000	1270	998	961	3228	1499 × 1143	2032
	30000	1451	998	943	3392	1499 × 1143	2032
300	2000	1179	998	966	3142	1499 × 1143	1524
	10000	1224	998	957	3224	1499 × 1143	1524
	15000	1360	998	952	3310	1499 × 1143	1524
	20000	1451	1270	1360	4081	1651 × 1321	2159
	30000	1542	1270	1360	4171	1651 × 1321	2159
375	2000	1270	1270	1360	3899	1651 × 1321	1651
	10000	1360	1270	1360	3990	1651 × 1321	1651
	15000	1451	1270	1360	4081	1651 × 1321	1651
	20000	1632	1270	1360	4262	1651 × 1321	2159
	30000	1723	1360	1360	4443	1676 × 1346	2464
500	2000	1496	1360	1360	4217	1676 × 1346	1956
	10000	1678	1542	1360	4579	1676 × 1346	1956
	15000	1904	1542	1814	5260	1829 × 1397	1676
	20000	1040	1542	1814	5396	1829 × 1397	2184
	30000	2176	1542	1814	5532	1829 × 1397	2184

Transformatoren mit Selbstkühlung.

25 Perioden. Gewichte und Größenverhältnisse.

Kilowatt	Volt	Gewicht				Größenverhältnisse	
		Transformator	Gehäuse	Öl	Gesamtgewicht	Fußbodenraum	Höhe
10	2000	159	113	91	363	635 × 483	864
	10000	181	113	91	385	635 × 483	864
	15000	204	147	150	501	838 × 559	914
	20000	249	215	190	654	940 × 584	1523
	30000	295	215	186	696	940 × 584	1523
15	2000	227	113	91	431	635 × 483	864
	10000	249	147	145	541	838 × 559	914
	15000	272	147	143	562	838 × 559	914
	20000	317	215	184	716	940 × 584	1523
	30000	363	215	179	757	940 × 584	1523
25	2000	272	147	143	562	838 × 559	914
	10000	295	215	186	696	940 × 584	1016
	15000	317	215	186	718	940 × 584	1016
	20000	363	363	567	1293	1092 × 889	1854
	30000	408	363	567	1338	1092 × 889	1854
37·5	2000	385	215	181	781	940 × 584	1016
	10000	408	215	181	804	940 × 584	1016
	15000	453	283	272	1008	965 × 737	1270
	20000	499	363	544	1406	1092 × 889	1854
	30000	635	363	544	1542	1092 × 889	1854

Kilowatt	Volt	Gewicht				Größenverhältnisse	
		Transformator	Gehäuse	Öl	Gesamtgewicht	Fußbodenraum	Höhe
50	2000	476	283	261	1020	965 × 737	1270
	10000	453	283	249	985	965 × 737	1270
	15000	612	283	249	1144	965 × 737	1270
	20000	680	363	544	1587	1092 × 889	1854
	30000	771	363	544	1678	1092 × 889	1854
75	2000	680	363	317	1360	965 × 787	1295
	10000	748	363	317	1428	965 × 787	1295
	15000	816	725	385	1926	1295 × 965	1270
	20000	907	725	589	2221	1295 × 965	1828
	30000	998	725	589	2312	1295 × 965	1828
100	2000	861	725	589	2175	1295 × 965	1321
	10000	952	725	589	2266	1295 × 965	1321
	15000	1043	725	589	2357	1295 × 965	1321
	20000	1134	907	748	2789	1321 × 1067	1930
	30000	1224	907	748	2879	1321 × 1067	1930
125	2000	952	907	771	2629	1269 × 965	1422
	10000	1042	907	771	2720	1269 × 965	1422
	15000	1134	907	771	2811	1269 × 965	1422
	20000	1224	907	748	2879	1269 × 965	1960
	30000	1315	907	748	2970	1269 × 965	1960
150	2000	1042	907	771	2720	1269 × 965	1422
	10000	1134	907	771	2811	1269 × 965	1422
	15000	1224	907	748	2879	1269 × 965	1422
	20000	1360	998	952	3310	1499 × 1143	2032
	30000	1451	998	952	3401	1499 × 1143	2032
200	2000	1179	907	748	2838	1499 × 1143	1422
	10000	1270	998	952	3219	1499 × 1143	1524
	15000	1360	998	952	3310	1499 × 1143	1524
	20000	1451	998	952	3401	1499 × 1143	2032
	30000	1587	998	907	3491	1499 × 1143	2032
250	2000	1360	1270	1360	3990	1651 × 1321	1651
	10000	1496	1270	1360	4126	1651 × 1321	1651
	15000	1632	1270	1315	4217	1651 × 1321	1651
	20000	1768	1270	1315	4353	1651 × 1321	2159
	30000	1950	1270	1315	4534	1651 × 1321	2159
300	2000	1814	1270	1315	4398	1651 × 1321	1651
	10000	1904	1270	1315	4489	1651 × 1321	1651
	15000	1995	1270	1315	4578	1651 × 1321	1651
	20000	2131	1270	1270	4670	1651 × 1321	2159
	30000	2267	1270	1270	4806	1651 × 1321	2159
375	2000	2267	1270	1270	4806	1651 × 1321	1651
	10000	2358	1270	1270	4897	1651 × 1321	1651
	15000	2448	1542	1768	5758	1829 × 1397	1676
	20000	2584	1542	1768	46701	1829 × 1397	2184
	30000	2720	1542	1723	46792	1829 × 1397	2184
500	2000	2720	1542	1723	46792	1829 × 1397	1676
	10000	2811	1542	1723	46883	1829 × 1397	1676
	15000	2902	1542	1723	46974	1905 × 1270	2032
	20000	3038	1904	2040	47745	1905 × 1270	2540
	30000	3174	1904	2040	47881	1905 × 1270	2540

den Kontakten eines Regulators derart verbunden sind, daß die *EMK* allmählich durch Vorwärtsschreiten von einem Kontakt zum anderen verändert werden kann.

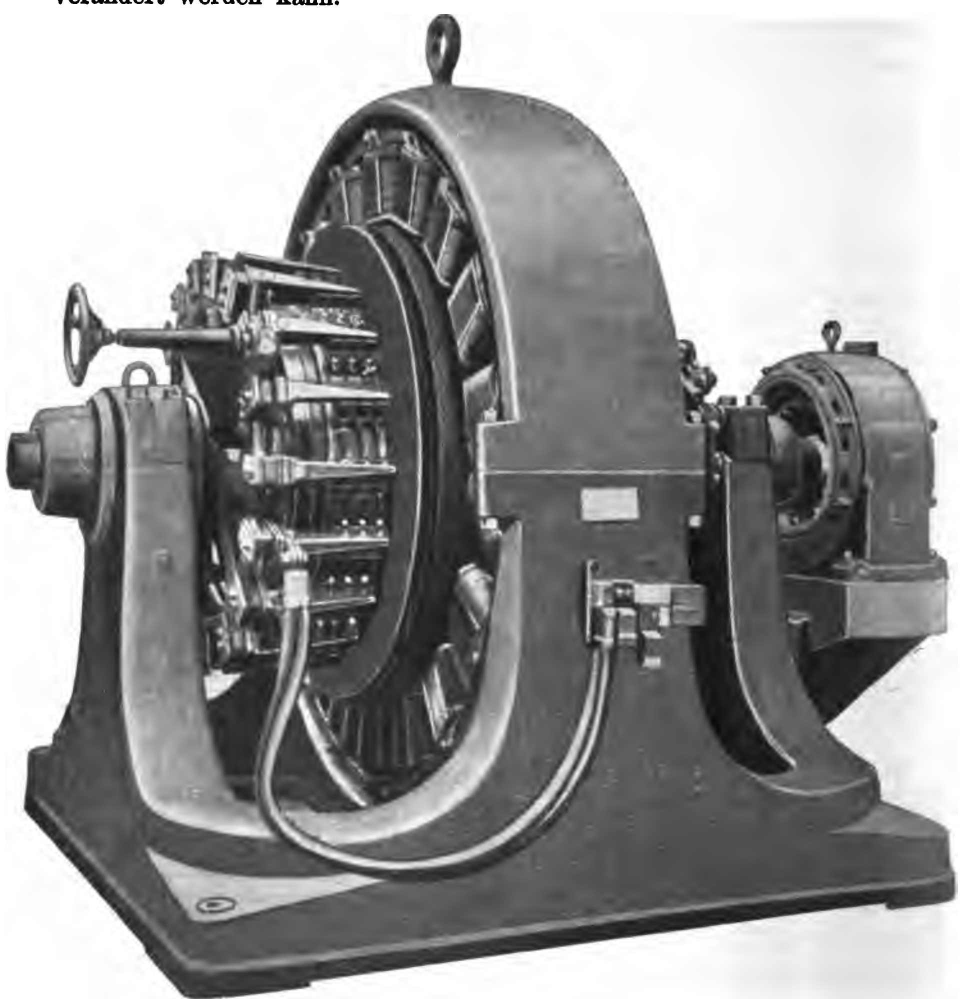


Fig. 280. 500. *KW*-Drehstromumformer mit Antriebsmotor.

Der rotierende Umformer kann parallel mit anderen Umformern oder mit anderen Stromerzeugern betrieben werden und kann entweder an der Seite, wo er Strom aufnimmt, oder an der anderen, wo er Strom abgibt, oder, wenn nötig, gleichzeitig an beiden Seiten mit äußeren Wechsel- beziehungsweise Gleichstromquellen parallel geschaltet werden.

Umformer in verschiedenen Stationen können ein und dasselbe Leitungsnetz speisen, vorausgesetzt, daß ihre Spannung entsprechend einreguliert ist. Zwei Umformer können in Reihenschaltung für ein Dreileitersystem betrieben werden, vorausgesetzt, daß Wechselstrom von gesonderten sekundären Stromkreisen geliefert wird.

Mechanischer Bau der rotierenden Umformer. Dem Aussehen nach ähnelt der Umformer einem Gleichstromerzeuger. Im Gegensatz zu letzterem sind jedoch beim Umformer Schleifringe vorgesehen.

Die Ankerwicklung des Umformers ist der einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine ähnlich. Diese Wicklung wird aber an gewissen Punkten mit den Schleifringen in Verbindung gebracht. Der Umformer hat also nur eine Wicklung, doch werden von derselben Verbindungen sowohl zu dem Stromwender als auch zu den Schleifringen geführt. Die Feldwicklung eines rotierenden Umformers ist ähnlich der Feldwicklung einer Gleichstrommaschine und kann entweder für Nebenschluß oder für Nebenschluß und Reihenschaltung (kompound) gewickelt werden.

Die Methode der Ausgleichsverbindung in der Ankerwicklung, welche zur Verbesserung der Gleichstromerzeuger in erhöhtem Maße beigetragen hat, wird mit gleichem Erfolge auch bei den rotierenden Umformern angewendet. Dieselbe ist ein wirksames Mittel, um das Funken am Stromwender zu verhindern, indem ein gleichförmiges Magnetfeld unter allen Polen erreicht wird.

Spannung und Periodenzahl. Das Verhältnis zwischen den Spannungen an der Wechsel- und Gleichstromseite eines Umformers bleibt annähernd gleich und kann nicht durch Erhöhung oder Verminderung der Umdrehungszahl oder durch Anwendung eines Nebenschlußrheostaten geändert werden, obgleich es bei Belastung des Umformers eine geringe Veränderung erfährt. Deshalb wird die Änderung der einen Spannung eine entsprechende Änderung der anderen zur Folge haben und ebenso umgekehrt. Bei den meisten Normalumformern beträgt die Spannung an den Schleifringen eines Zweiphasengleichstromumformers ungefähr $^7/_{10}$ von derjenigen am Stromwender und die Spannung an den Schleifringen eines Dreiphasen-Gleichstromumformers ist ungefähr $^6/_{10}$ von derjenigen am Stromwender.

Ein Zweiphasen-Gleichstromumformer, welcher Wechselstrom zu annähernd 385 Volt empfängt, wird somit Gleichstrom zu 550 Volt abgeben und ein Dreiphasen-Gleichstromumformer, welcher Wechselstrom von annähernd 330 Volt empfängt, wird Gleichstrom von 550 Volt abgeben.

Bei einem Dreiphasen-Gleichstromumformer können zweierlei Spannungen erhalten werden. Wird nämlich ein Ankerleiter mit dem Mittelpunkte der sekundären Windungen des Transformators verbunden, welcher Strom an den Drehstromumformer abgibt, so findet man, daß die *EMK* zwischen diesem Leiter und irgend einer der Gleichstrombürsten gleich ist der Hälfte der *EMK* zwischen den Bürsten. Auf diese Weise können also z. B. 110 Volt von einem 220 Volt-Drehstromumformer erhalten werden. Diese Methode dient in einigen Zentralen zur Spannungsteilung im Dreileiter-Beleuchtungssystem. In anderen Anlagen findet diese Methode Anwendung, um zwei Spannungen zu erhalten, welche zum Betriebe von Gleichstrommotoren mit verschiedener Umdrehungsgeschwindigkeit oder für andere Zwecke benötigt werden.

Normale Drehstromumformer sind für 3000, 3600, 6000 oder 7200 Polwechsel und zur Abgabe von Gleichstromspannungen von 125, 250 oder 550 Volt ausgeführt.

Spannungskurve, Ausgleichsströme u. s. w. Drehstromumformer müssen der Spannungskurve der Stromerzeuger angepaßt werden, welche den Strom liefern, da sonst ein wattloser Strom zwischen den beiden Maschinen fließen würde. Ein Ausgleichsstrom kann eine übermäßige Erhitzung der Umformeranker und der Stromerzeuger herbeiführen und weitere Verluste im Kraftübertragungsnetze verursachen.

Im allgemeinen besteht jedoch keine Schwierigkeit, an jedes Wechselstromnetz rotierende Umformer anzuschließen und letztere den Eigenschaften desselben entsprechend herzustellen.

Verluste und Nutzeffekt. Die Verluste, welche in den rotierenden Umformern auftreten, sind ungefähr dieselben wie in den Gleichstrommaschinen von derselben Leistung.

Der Nutzeffekt kann also sehr hoch sein.

Das Funken. Eine gute Stromwendung läßt sich in einem rotierenden Umformer leichter erreichen als in einem Gleichstromerzeuger, auch durch das Vertauschen der Zuführungen entstehen keinerlei Schwierigkeiten. Wenn Funken auftreten, so wird dies wahrscheinlich entweder durch die Rauheit des Stromwenders oder durch mangelhafte Einstellung der Bürsten oder durch irgend eine andere unbedeutende Ursache hervorgerufen.

Für die Überlastung und das Funken können dieselben Grenzen wie für einen Gleichstromerzeuger angenommen werden.

Pulsierende Umdrehungen. Ist die Periodenzahl des treibenden Stromsystems, mit dem der rotierende Umformer verbunden

ist, nicht gleichförmig, so wird die Umdrehungsgeschwindigkeit des Umformers sich entsprechend ändern müssen, indem der Anker bei Zunahme der Periodenzahl schneller, bei Abnahme derselben langsamer läuft.

Wenn solche Schwankungen im Stromkreise einander sehr rasch folgen, so kann der Anker des Umformers nur mit Mühe nachkommen und es entsteht ein eigentümliches Pulsieren in der Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers.

Es ist deshalb unerläßlich, daß die Umdrehungszahl des Stromerzeugers innerhalb gewisser Grenzen gleichförmig bleibe.

Die Umformer werden mit einer besonderen Vorrichtung versehen, welche an den Polenden angebracht ist und wodurch die Tendenz zu pulsierenden Umdrehungen eingeschränkt wird, so daß diese Umformer tatsächlich unabhängig sind von den Schwankungen, welche im praktischen Betriebe gewöhnlich vorkommen.

Anlaßmethoden. Der rotierende Umformer setzt sich unter den gleichen Bedingungen in Bewegung, wie ein Synchronmotor, welcher bekanntlich erst dann ein entsprechendes Drehmoment entwickelt, wenn er auf normale Umlaufszahl gebracht worden ist. Der Umformer kann unmittelbar von der Wechselstromleitung aus angelassen werden. Diese Methode ist jedoch nicht anzuempfehlen, insofern dadurch vorübergehend ein großer Strom bei geringem Leistungsfaktor dem treibenden System entzogen wird. Die Regulierung der anderen Vorrichtungen, die von demselben System abhängen, kann dadurch leiden. Diese Methode sollte deshalb nur dann Anwendung finden, wenn die Leistungsfähigkeit des Umformers im Vergleiche zur Leistungsfähigkeit des Erzeugers eine kleine ist.

Eine andere Methode, um den Umformer in Betrieb zu setzen, ist die, ihn als Gleichstrommotor vom Stromwender aus anzulassen und so auf Synchronismus zu bringen, um ihn dann an die Wechselstromzuführungen zu schalten.

Diese Methode ist praktisch, erfordert aber ein gewisses Quantum von Gleichstromenergie, welches in einer Wechselstromstation nicht immer verfügbar ist.

Eine dritte, und zwar die beste, welche auch mit unserer Normalmethode im Einklang steht, besteht darin, daß der Umformer mit Hülfe eines kleinen Induktionsmotors, der auf der Welle desselben angebracht ist, angelassen wird; sobald der Umformer auf diese Weise auf Normalgeschwindigkeit gebracht worden ist, kann er an die Wechselstromleitungen geschaltet werden. Diese Methode ist empfehlenswert, weil dabei die Inanspruchnahme der Leistungsfähigkeit des Netzes sich auf

den geringen Strom beschränkt, welcher für den kleinen Induktionsmotor nötig wird.

Änderungen der *EMK.* Es gibt mehrere Methoden, nach welchen die von einem rotierenden Umformer abgegebene Gleichstromspannung verändert werden kann, die sämtlich von der richtigen Veränderung der Spannung des Wechselstromsystems abhängig sind.

Wird diese Spannung erhöht oder vermindert, so ändert sich entsprechend die Spannung der Gleichstromseite.

Zur Erzeugung der gewünschten Änderung der Wechselstromspannung können die Transformatoren verwendet werden, welche den hochgespannten Wechselstrom in Niederspannungsstrom, wie derselbe für die Umformer erforderlich ist, transformieren. Zu diesem Zwecke werden einzelne Spulen aus den Windungen derselben zu besonderen Kontakten geführt, so daß eine Änderung des Umformungsverhältnisses möglich wird. Sofern ein passender Regulator vorgesehen ist, kann dieser Wechsel des Umformungsverhältnisses auch während des Betriebes bewirkt werden. Diese Methode wird gewöhnlich da angewendet, wo Strom für Glühlampen abzugeben ist und Akkumulatorenbatterien in Verwendung sind.

Die Spannung, welche vom rotierenden Umformer abgegeben wird, kann auch bis zu einem gewissen Grade durch Änderung des Erregerstromes des Umformers beeinflußt werden. Natürlich ändert sich hiedurch die *EMK* im Wechselstromkreise ebenso wie für den Gleichstromkreis. Bei dieser Regulierungsmethode wird der Strom in der Phase verschoben und muß daher im Stromkreis zwischen dem Erzeuger und dem Umformer Selbstinduktion von gewisser Größe vorhanden sein.

Kompoundierung von rotierenden Umformern. Die Änderung der von einem Drehstromumformer abgegebenen Spannung, kann auch auf selbsttätige Weise dadurch geschehen, daß die Felderregung des Umformers mit „Kompound“-Wicklung, ähnlich wie für gewisse Gleichstrommaschinen, versehen wird. Die in Reihe liegenden Windungen gleichen dann den Spannungsabfall aus, welcher bei Belastung entstehen würde. Hiedurch wird eine gleichbleibende Spannung erreicht oder es kann sogar, wenn der Grad der Kompoundierung und die Selbstinduktion des Stromkreises dies ermöglichen, die Gleichstromspannung mit zunehmender Belastung zunehmen.

Drehstromumformer zur Abgabe von Wechselstrom. Wird dem rotierenden Umformer Gleichstrom zugeführt und gibt derselbe Wechselstrom ab, so kann die Umdrehungszahl nicht so leicht

mehr stetig erhalten werden, wie dies der Fall ist, wenn der Umformer Strom von einer Wechselstromleitung empfängt, in welcher die Periodenzahl durch die Laufgeschwindigkeit der Wechselstrommaschine bestimmt ist. Wird der Wechselstromumformer durch Gleichstrom betrieben, so unterliegt seine Umdrehungsgeschwindigkeit den Gesetzen des Gleichstrommotors und wird durch die Stromstärke im Felde und durch die Rückwirkung des Ankerstromes auf das Feld bestimmt. Diese Rückwirkung des Ankers ist dann manchmal sehr bedeutend. Der Drehstromumformer erscheint deshalb, namentlich bei wechselnder Belastung, großen Schwankungen in der Umdrehungsgeschwindigkeit ausgesetzt und kann eine übermäßige Geschwindigkeit erreichen, wenn nicht besondere Vorkehrungen zu deren Verhütung getroffen werden. Diese Umformer zur Abgabe von Wechselstrom sind mit einem besonderen Erreger versehen, welcher von dem Umformer getrieben wird und seine Umdrehungszahl in dem Maße ändert, als die Umdrehungszahl des Drehumformers sich ändert. Der Erreger wird gewöhnlich auf der verlängerten Welle des rotierenden Umformers angebracht, kann aber auch mit Riemen oder durch einen Induktionsmotor getrieben werden, welcher seinen Strom vom Umformer empfängt. Dieser Erreger hat ein ungesättigtes Magnetfeld; eine geringe Zunahme seiner Laufgeschwindigkeit erhöht ganz bedeutend die von ihm abgegebene Spannung; wenn daher der rotierende Umformer an Laufgeschwindigkeit zuzunehmen droht, so veranlaßt schon eine kleine Zunahme eine Verstärkung seiner Erregung, wodurch eine weitere Zunahme der Geschwindigkeit verhütet wird. Das Resultat ist somit, daß die Umdrehungszahl selbsttätig konstant gehalten wird und Schwankungen nur in sehr engen Grenzen auftreten können.

Umformer dieser Art sind besonders zweckdienlich, wenn Wechselstrom von einer Gleichstromstation abgegeben werden soll, sei es entweder für entfernte Beleuchtungsanlagen oder für Motoren oder zur Abgabe von Wechselstrom an eine entfernte Station, wo solcher wieder in Gleichstrom entweder für Beleuchtungs- oder Straßenbahnbetrieb Umsetzung finden kann. Solche Umformer sind natürlich auch zur Umwandlung von Gleichstrom aus einer Akkumulatorenbatterie in Wechselstrom verwendbar.

Normalgrößen. Rotierende Umformer werden normal für 25, 30, 50 und 60 Perioden oder 3000, 3600, 6000 oder 7200 Polwechsel in der Minute hergestellt. Die Normalspannungen sind 250 und 500 Volt. Die Leistungen enthält folgende Tabelle. Sämtliche Umformer werden für Zwei- oder Dreiphasenstrom gebaut.

Westinghouse rotierende Umformer.

Perioden	Gleichstrom-spannung	Kilowatt	Tourenzahl	Gewicht kg
25	125	100	500	4534
„	250	„	„	4081
„	„	150	„	7708
„	„	200	„	7980
„	„	300	375	10202
„	„	400	„	13421
„	„	500	„	15870
„	550	100	500	4081
„	„	150	„	7708
„	„	200	„	7980
„	„	250	„	7980
„	„	300	„	10202
„	„	400	„	13421
„	„	500	„	15870
„	„	600	375	20857
„	„	1000	300	34913
„	„	1500	250	49876
30	125	37·5	900	1814
„	„	100	600	4534
„	250	100	„	4081
„	„	150	„	7708
„	„	200	„	7980
„	„	300	450	10202
„	„	400	„	13421
„	„	500	„	15870
„	550	100	600	4081
„	„	150	„	7708
„	„	200	„	7980
„	„	250	„	7980
„	„	300	„	10202
„	„	400	„	13421
„	„	500	450	15870
„	650	200	600	7980

Westinghouse rotierende Umformer.

Perioden	Gleichstrom-spannung	Kilowatt	Tourenzahl	Gewicht *kg*
50	125	1·87	1500	170
"	"	5	"	385
"	"	7·5	"	476
"	"	37·5	1000	1814
"	"	75	600	5441
"	250	37·5	1000	1814
"	"	75	600	5441
"	"	100	750	4081
"	"	150	600	7708
"	"	200	"	9522
"	"	300	428	12832
"	"	400	333	15416
"	"	500	300	18116
"	550	37·5	1000	1814
"	"	100	750	4081
"	"	150	600	5441
"	"	200	"	9522
"	"	300	500	12832
"	"	400	375	15416
"	"	500	333	18116

207. Transformatoren von Ganz & Co. in Budapest. Fig. 281 stellt einen Dreiphasentransformator der Firma Ganz & Co. dar, welcher auf der Pariser Weltausstellung 1900 ausgestellt war. Dieser Transformator hat eine Kapazität von 30 Kilovoltampère und transformiert Generatorstrom von 2200 Volt auf 220 Volt herunter. Derselbe ist nach der neuesten Type der obgenannten Firma gebaut und besteht aus drei in einer Ebene liegenden lamellierten Eisensäulen von viereckigem Querschnitt, deren Enden mit zwei lamellierten Schlußstücken verbunden sind. Auf den Kernsäulen sind Primär- und Sekundärspulen abwechselnd angeordnet und durch einige hervorstehende Bleche der Schlußstücke fixiert. Zum Zusammenfassen der Bleche und zum Befestigen des Transformators am Gestell dienen vier Mutterschrauben und zwischengelegte Distanzröhren. Komplettes Gewicht des Transformators 800 *kg*. Zur Repräsentation von größeren Transformatortypen hatte die genannte Firma einen Einphasentransformator, Fig. 282 und Fig. 244 und 245, mit einer Kapazität von 300 Kilovoltampère, für 5000 Volt Primärspannung, 430 Volt Sekundärspannung und 42 Perioden

ausgestellt. Der Kern dieses Transformators ist aus zwei vertikalen, lamellierten Säulen von kreisförmigem Querschnitt und zwei horizontalen, ebenfalls lamellierten Verbindungsstücken hergestellt; der Kern hat also einen einfachen magnetischen Kreis. Der ganze Transformator ruht auf einem zweiteiligen gußeisernen Gestell, welches das untere Verbindungsstück des Kernes in sich schließt. Die zwei Teile sind miteinander durch starke Schrauben, mit der oberen gußeisernen Konstruktion durch zwei starke schmiedeeiserne Stangen verbunden, so daß die Eisenkonstruktion ein kompaktes Ganzes bildet.

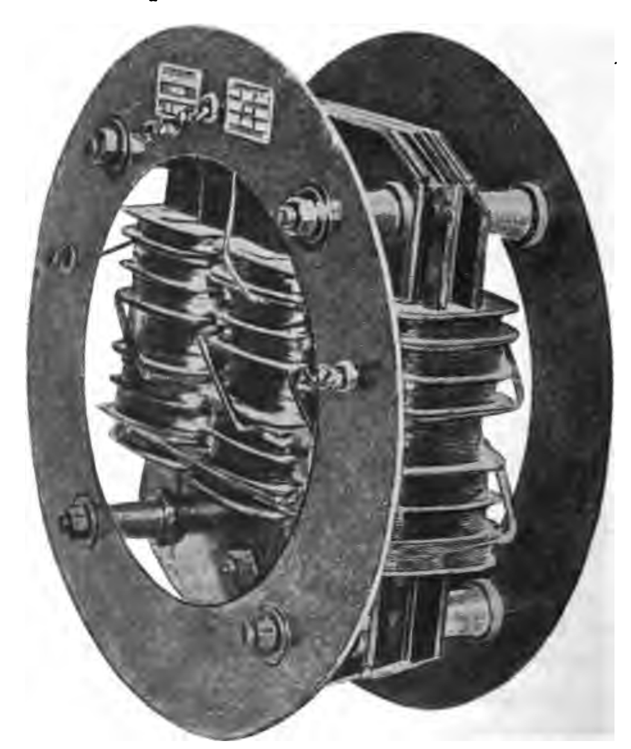


Fig. 281. Dreiphasen-Kerntransformator.

Direkt auf dem Kern befinden sich die Primärspulen; diese sind von den Sekundärspulen umgeben, so daß zwischen denselben noch genügender Luftraum für die Ventilation bleibt.

Für denselben Zweck ist auch der Kern in der Richtung der Lamellierung mit Luftspalten versehen, welche eine wirksame Ventilation ermöglichen. Die Sekundärspulen wurden aus blanken Kupferstangen von 25 × 25 *mm* Querschnitt hergestellt. Bei dieser Anordnung der Spulen ist die Streuung kleiner, wie bei der Reihenanordnung

der Primär- und Sekundärspulen; außerdem ist eine Berührung der Hochspannungsspulen ganz ausgeschlossen.



Fig. 282. Einphasen-Kerntransformator.

Bei künstlicher Ventilation mit einem einpferdigen Zentrifugalventilator und bei einer Dauerbelastung mit 300 Kilovoltampère erwärmt sich kein Teil des Transformators um mehr als 25° C. über die Tempe-

ratur der Umgebung. Der Transformator hat 4000 *kg* Gewicht und bei voller Belastung 98·3% Wirkungsgrad. Fig. 282 zeigt eine Ansicht des Transformators, Fig. 244 und 245 eine Konstruktionszeichnung. Dieser Transformator wurde früher (§ 186) berechnet.

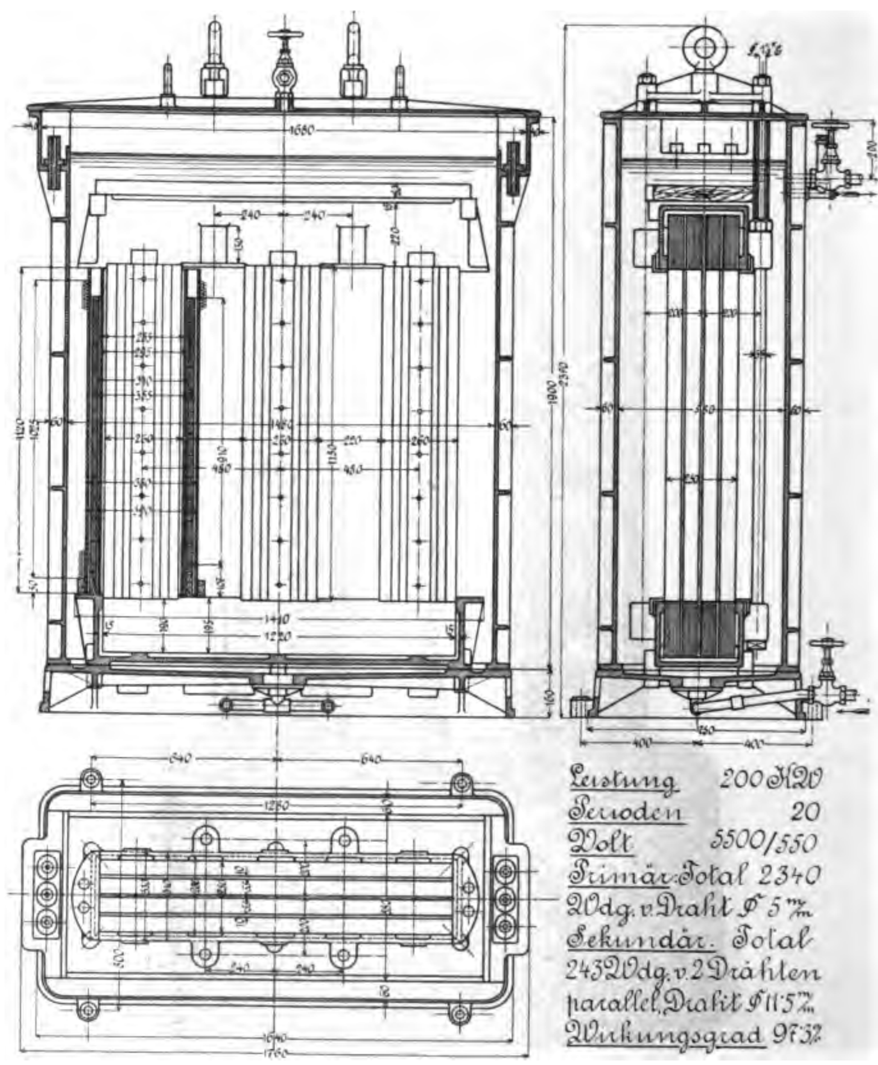


Fig. 283. Drehstrom-Öltransformator.

208. Transformatoren der E.-A.-G. vormals Kolben & Co., Prag-Vysočan. Fig. 283 veranschaulicht einen Drehstrom-Öltransformator, Type △ *T* 200. Maßstab 1 : 9·84. Leistung: 200 Kilovoltampère, Perioden: 20, Volt $\frac{5500}{550}$.

Primär: Total 2340 Windungen, Drahtdurchmesser = 50 *mm*.

Sekundär: Total 243 Windungen, 2 Drähte parallel, Drahtdurchmesser = 11·5 *mm*. Eisentemperatur 36° C. über Raumtemperatur. Wirkungsgrad: 97·3%.

Fig. 284 gibt einen Bogenlampentransformator der Type *L T 2* wieder. Maßstab 1 : 4. Leistung: 120/2 × 36 Volt, 20 Ampère. Total für beide Kerne 120 Windungen von 3/3·5 Drahtdurchmesser für einen Kern in drei Abteilungen gewickelt.

Abteilung *I.* 42 Windungen.
Abteilung *II.* 39 Windungen.
Abteilung *III.* 39 Windungen.

Transformatoren. Übersicht.

Wechselstromtransformatoren, Modell *W T*, zwei Kerne, 42 und 50 Perioden, 1000, 2000, 3000, 5000 Volt primär 120, 240 Volt sekundär. Neun Größen von $^1/_2$ bis 48 Kilowatt.

Drehstromtransformatoren, Modell *A T*, drei Kerne liegend nebeneinander; 42 und 50 Perioden, 1000, 2000, 3000, 5000 und 8000 Volt primär, 120 und 240 Volt sekundär. Zehn Größen von 1 bis 100 Kilowatt. Die Transformatoren über 100 Kilowatt mit Luftventilator, Kerne und Joche mit Ventilationskanälen; drei Größen von 150, 200 und 300 Kilowatt.

Drehstrom-Gleichstromtransformatoren. Übersicht.

Modell △ *G* + *G D*, von 100 bis 450 Kilowatt, für Bahnbetrieb, für 1000 bis 8000 Volt Drehstrom, 600 Volt Gleichstrom. Gleichstrommaschine *I 1 c*. Drei Lager, unmittelbar gekuppelter Erreger.

209. Fr. Křižik, Elektrotechnische Fabrik, Prag-Karolinenthal. In Fig. 285 ist ein **Einphasentransformator** dargestellt. Maßstab 1 : 8. Leistung: 0·6 Kilowatt bei $\frac{1050}{120}$ Volt und $\frac{0·7}{5}$ Ampère. Eisenquerschnitt 5 . 5 . 0·87 = 26 cm^2. Länge eines Schenkels 23 *cm*.

Windungszahl einer Spule Z_1 = 11 . 40, Draht = 0·9/1·5,
Z_2 = 3 . 63, Draht = 2·6/3·3

Verluste: Hohe Spannung	12·7	Watt
Niedrige Spannung	10·8	Watt
Eisen (η = 0·002)	28	Watt
	51·5	Watt.

Nutzeffekt: 92%. Leerlaufstrom 0·08 Ampère.

Streuungsversuch: Bei 5 Ampère Kurzschlußstrom in der dicken Wicklung, 93 Volt in der dünnen.

Fischer-Hinnen, vormals Direktor dieser Firma, hat bei perforierten Blechen stets die Beobachtung gemacht, daß die Lüftung unvollkommen ist, weil ähnlich wie in einem Kamin mit undichten

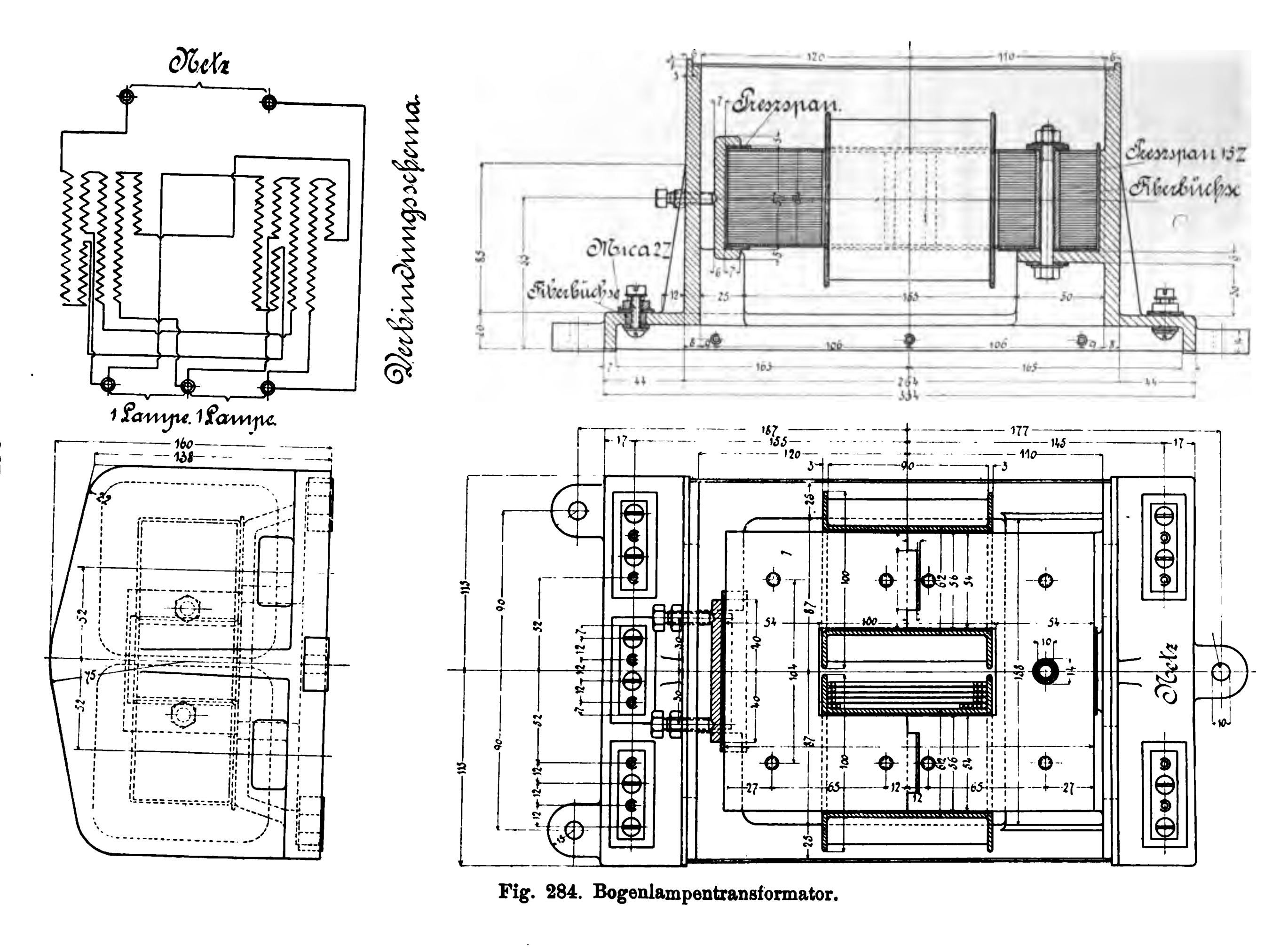


Fig. 284. Bogenlampentransformator.

Stellen kein richtiger Luftzug entstehen kann. Um diesen Übelstand zu vermeiden, sind diese Transformatoren an den Seiten vollkommen luftdicht abgeschlossen. Die Luft tritt durch eine Öffnung in der Fundamentplatte ein, bestreicht sodann die ganze Wicklung und tritt durch den Deckel wieder ins Freie.

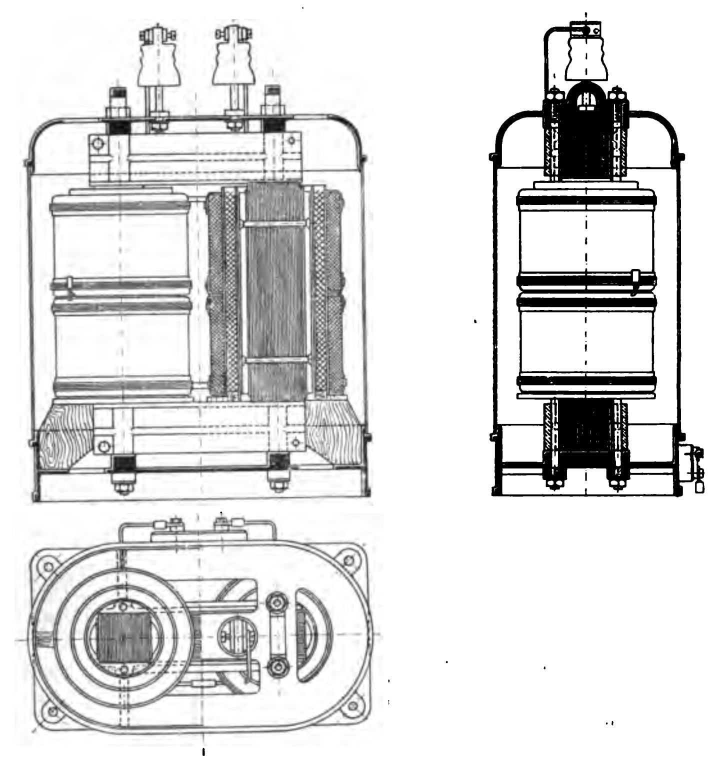


Fig. 285. Einphasentransformator.

Fig. 286 zeigt einen Drehstromtransformator.

Maßstab: 1 : 10. Leistung: 3 Kilowatt $\frac{3300}{190}$ Volt.

Perioden: 50.

Primär: 3 Spulen in einer Phase à 1204 Windungen.

Draht 0·96 *mm* Durchmesser. Widerstand 50·7 Ohm.

Sekundär: 1 Spule in einer Phase, 381 Windungen.

Draht 2·5 *mm* Durchmesser. Widerstand 5·18 Ohm.

Schaltung: Primär: Stern, sekundär: Dreieck.

Versuchsangaben: Bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung und normalem Strom sind primär 133 Volt erforderlich. Daraus folgt, daß der Spannungsabfall bei $\cos\varphi \doteq 0{\cdot}7$ nur $4{\cdot}83\%$ beträgt.

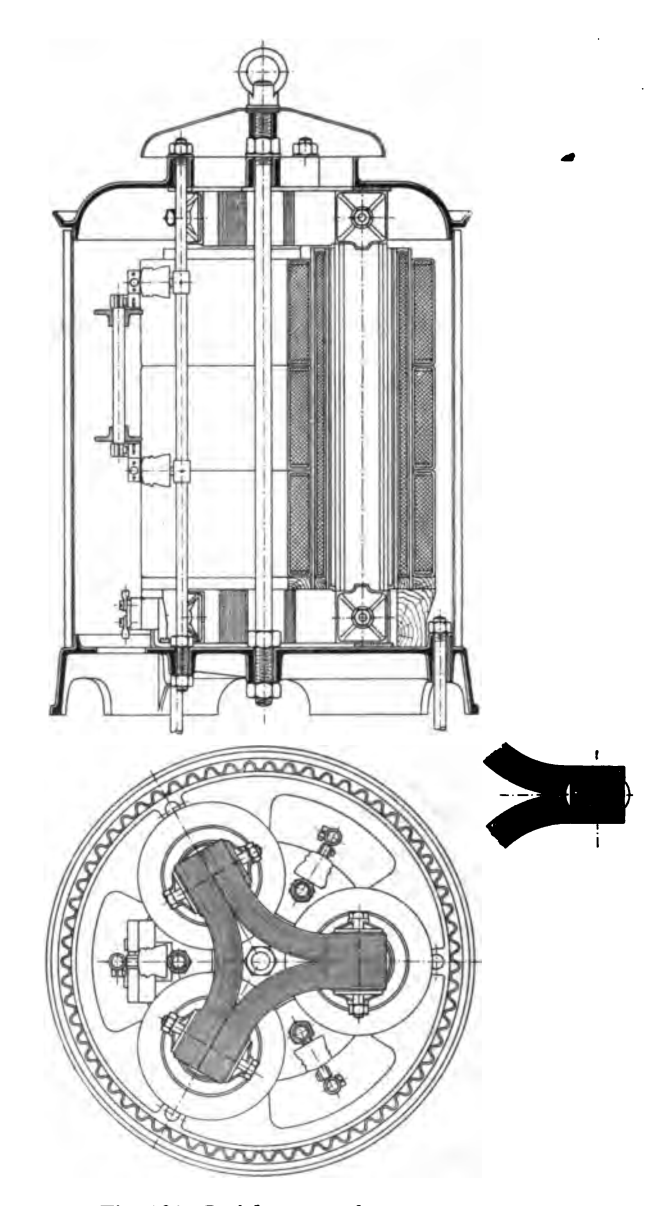


Fig. 286. Dreiphasentransformator.

Leerlaufstrom = 0·059 Ampère = 10%. Der obige Transformator ist besonders für Motorbetrieb gebaut, in welchem Falle der Leerlaufstrom größer sein kann, wogegen der Spannungsabfall möglichst klein sein soll.

Verluste: Primär: Kupfer 1·4%.
Sekundär: Kupfer 1·43%.
Eisenverlust 5·2%.

210. Maschinenfabrik Örlikon in Örlikon. In Figur 287 ist ein **Einphasentransformator** Type 1609 ersichtlich. Maßstab: 3 : 40. Leistung: 20 *K V A*.

Fig. 288 versinnlicht einen Dreiphasentransformator Type 3409. Maßstab: 1 : 10.

Leistung: 30 *K V A*.

T r a n s f o r m a t o r e n. Übersicht.

Wechselstromtransformatoren bis 20 Kilowatt, drei wagrechte

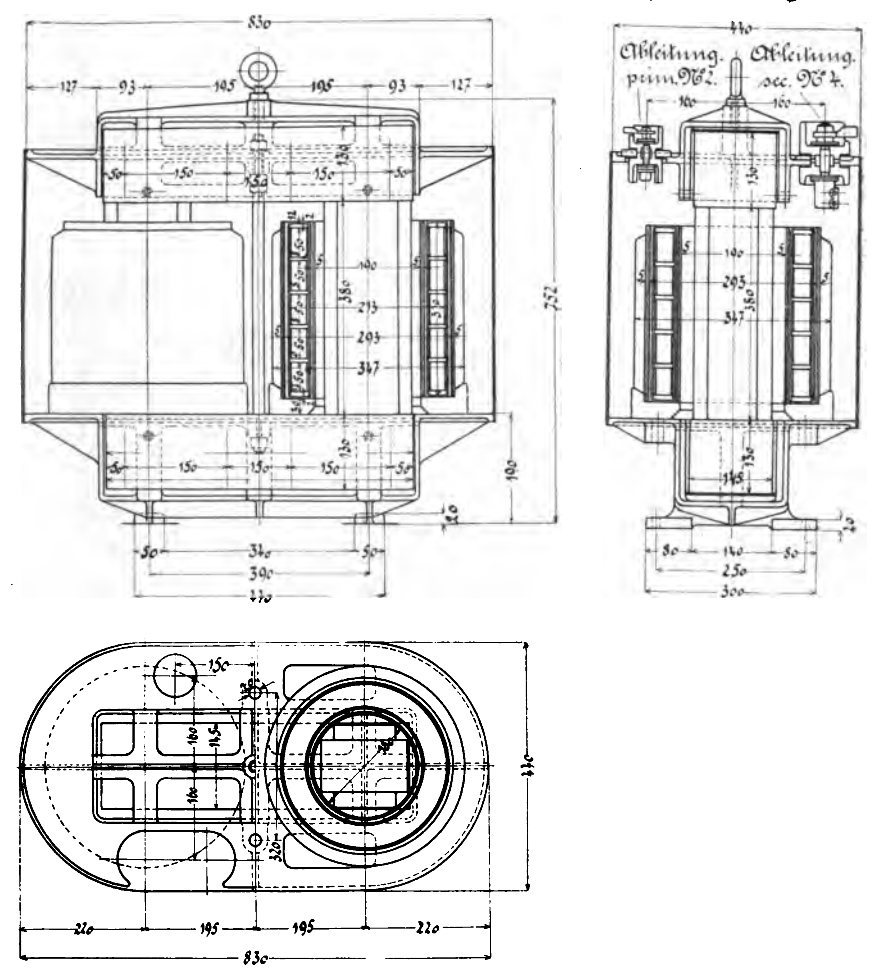


Fig. 287. Einphasentransformator.

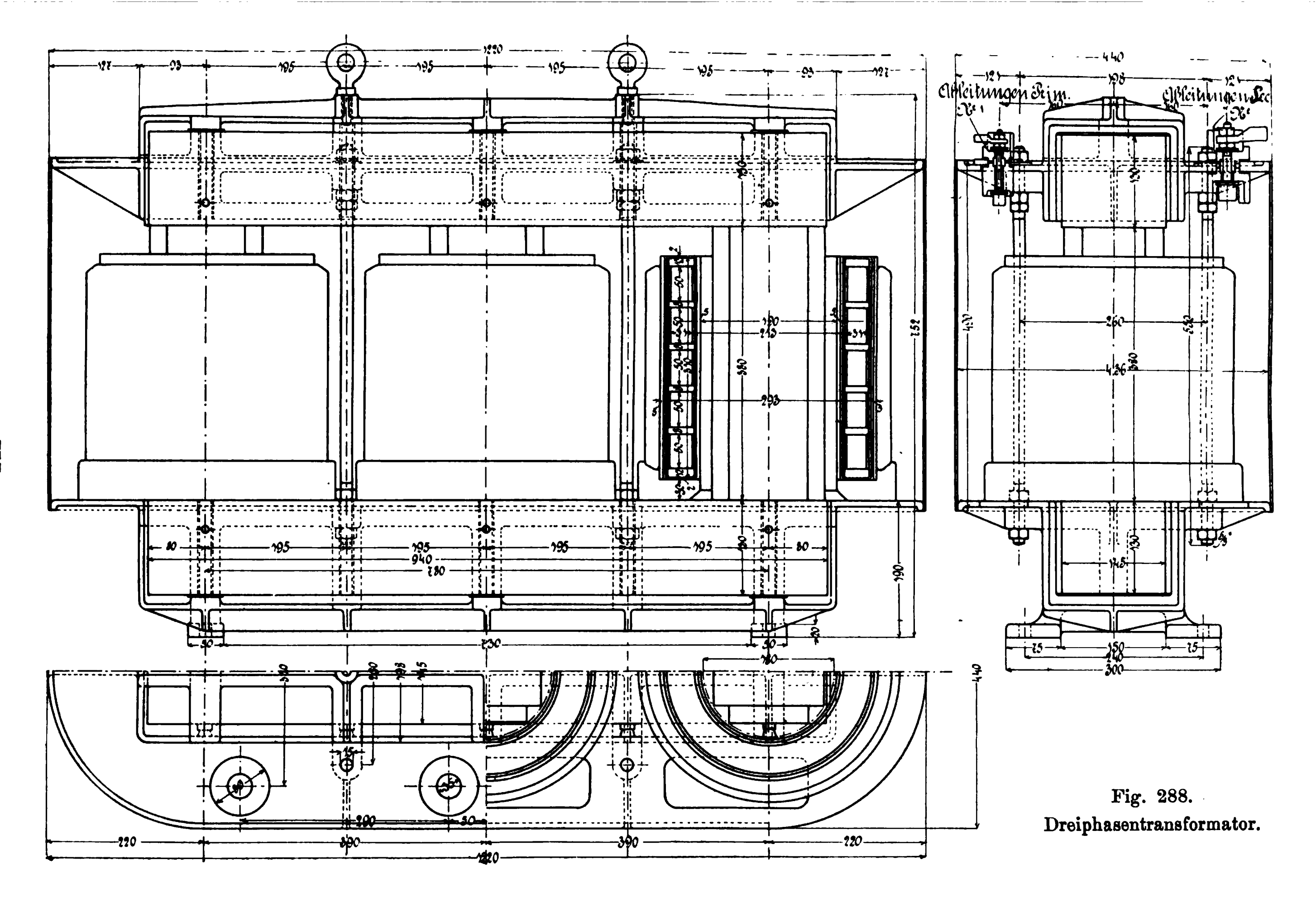


Fig. 288.
Dreiphasentransformator.

Kerne in zweiteiligem Gehäuse, 1000 bis 50 Volt, 50 Perioden. Neun Größen, 0·5 bis 20 Kilowatt.

Transformatoren für Ein- und Dreiphasenstrom, zwei oder drei Kerne (. . .), stehend, 1750, 3400, 5000 Volt, 50 Perioden. Für Einphasenstrom sechs Größen, 30 bis 250 Kilowatt; für Drehstrom 14 Größen, 3·5 bis 440 Kilowatt.

211. Transformatoren von Brown, Boverie & Cie., Baden.

Transformatoren für Ein- und Mehrphasenstrom.

a) Ohne Öl mit natürlicher Kühlung, zwölf Größen von 0·5 bis 40 Kilowatt mit zwei wagrechten Säulen, sechs Größen von 50 bis 140 Kilowatt mit 2 und 3 senkrechten Säulen; bis 8000 Volt.

b) Mit Öl ohne künstliche Kühlung, 24 Größen von 1·5 bis 300 Kilowatt, 2 bis 3 senkrechte Säulen, bis 15.000 Volt, für Laboratoriumszwecke bis 200.000 Volt.

c) In Öl mit künstlicher Kühlung, acht Größen von 200 bis 1000 Kilowatt, 1, 2 oder 3 senkrechte Säulen, bis 50.000 Volt.

Umformer. Übersicht.

Umformer von Dreiphasenwechselstrom in Gleichstrom für Spannungen bis 600 Volt in Gleichstrom mit gemeinsamem Anker für Mehrphasen- und Gleichstrom, 200 bis 100 Umdrehungen, 18 Größen von 2 bis 1000 *P*.

212. Transformatoren der Elektrizitäts-Gesellschaft Alioth, Münchenstein-Basel. Übersicht.

Transformatoren bis 10.000 Volt, 50 Perioden, rechteckiger Bau, für Einphasenstrom in 17 Größen von 0·3 bis 200 Kilowatt.

Für Dreiphasenstrom in 15 Größen von 0·5 bis 200 Kilowatt.

Regulierbare Wechselstromumformer.

Übersicht. Modell *Q* bis *Z* zwischen 125 bis 150 Volt regulierbar, für Ein- und Mehrphasenstrom in zehn Größen von 11 bis 170 Kilowatt resp. von 14 bis 225 Kilowatt.

Gleichstrom-Wechselstromumformer.

Model *C* bis *Z* bis 1200 Volt Gleichstrom, für Ein- und Mehrphasenstrom, 50 Perioden; vier- bis zwanzigpolig, geschlossener, ringförmiger Bau; 15 Größen von 1·7 bis 190 Kilowatt resp. 2·3 bis 250 Kilowatt.

V. Kapitel.

Drosselspulen.

213. Drosselspule. Eine Drosselspule unterscheidet sich von einem Elektromagnete (I. T., 1. B., S. 48) dadurch, daß der Eisenkern, so wie bei jeder Wechselstromvorrichtung, aus einzelnen Eisenblechen

zusammengesetzt ist, welche voneinander durch dünnes Papier isoliert sind. Den Elektromagnet verwendet man bei Gleichstrom, die Drosselspule bei Wechselstrom. Die Drosselspule besteht demnach aus einem unterteilten Eisenkerne, welchen eine Spule isolierten Kupferdrahtes umgibt. Die Isolation der Eisenbleche bezweckt die Vermeidung von Wirbelströmen im Eisen.

214. Wirkung der Drosselspule. Schaltet man eine Drosselspule in einen Wechselstromkreis ein, so entstehen im Eisen derselben Kraftlinien (ein magnetisches Feld). Letztere wirken induzierend auf die Windungen zurück, so daß der volle Strom, welcher dem Ohmschen Gleichstromgesetz (I. T., 1. B., S. 23) $J = \frac{E}{W}$ entspricht, nicht zu stande kommen kann.

Es gilt dann das Ohmsche Gesetz für Wechselstrom (S. 48):

$$J = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$

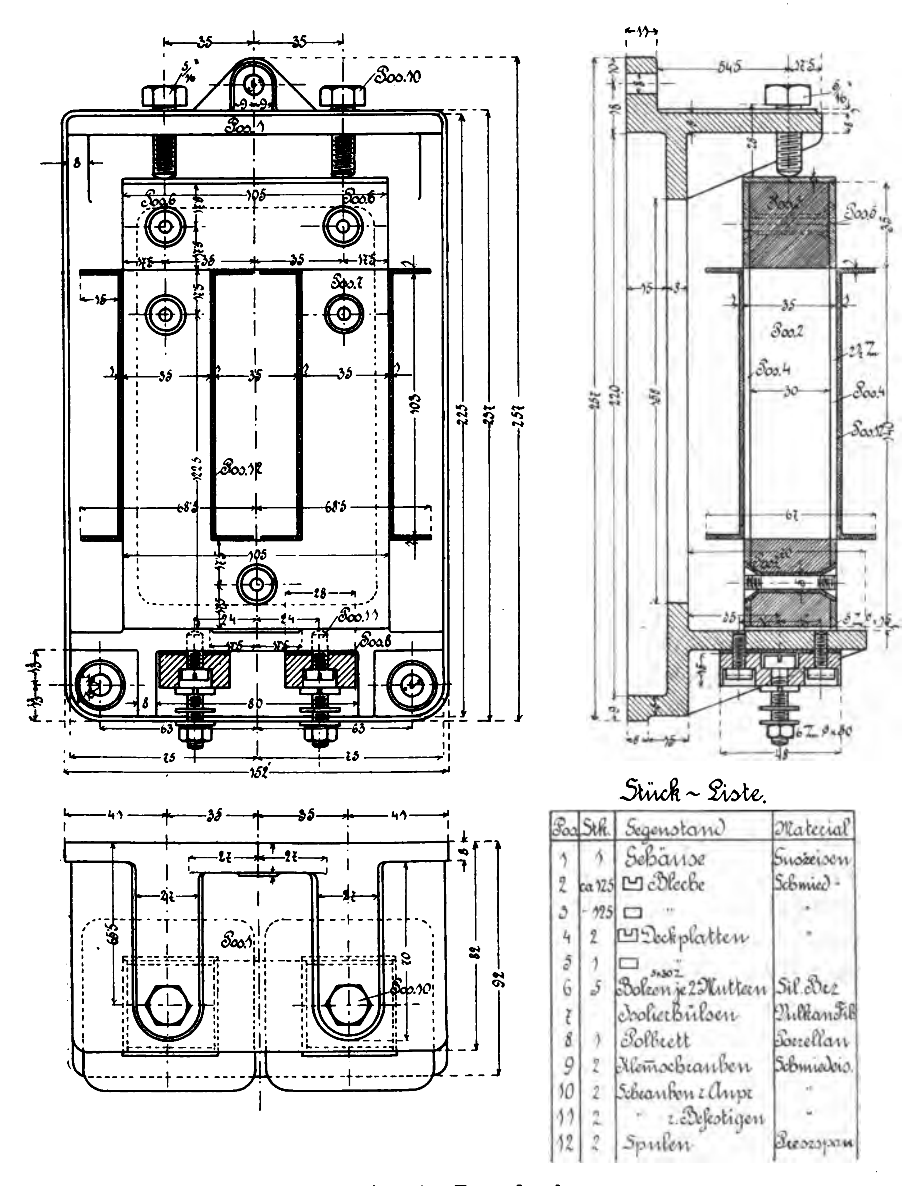
Durch die Rückwirkung der Kraftlinien auf die Windungen (Selbstinduktion) wird der Ohmsche Widerstand der Windungen *scheinbar* erhöht. Die Drosselspule wirkt demnach ähnlich wie ein Ohmscher Widerstand. Da jedoch der Wattverlust durch den geringen Widerstand der Kupferwicklung sehr klein ist, gehen durch die Drosselspule weniger Watt verloren als durch einen Ohmschen Widerstand, welcher die Drosselspule zu ersetzen vermag. Da der Wattverlust durch die Drosselspule sehr klein ist, so wirkt dieselbe hauptsächlich durch Selbstinduktion. Man nennt deshalb die Drosselspule einen *energielosen* Widerstand. Das Diagramm der Drosselspule ist das Diagramm eines Transformators (§ 188) bei ausgeschaltetem äußeren Stromkreise. Das dort Gesagte gilt demnach auch an dieser Stelle.

Wenden wir Fig. 50 auf die Drosselspule samt hintereinander geschalteter Bogenlampe (beziehungsweise Bogenlampen) an, so herrschen folgende Beziehungen: OB, Fig. 50 = Spannung der Bogenlampe beziehungsweise Bogenlampen), BC = Ohmscher Spannungsverlust der Drosselspule, AB = Spannung der Drosselspule samt Spannung, welche für die Überwindung des Ohmschen Widerstandes der Drosselspule erforderlich ist, OA = Gesamtspannung.

Bei Drosselspulen muß der Erregerstrom nahezu so groß sein wie der Gesamtstrom. Man unterbricht deshalb zumeist den Eisenkern durch Luft (beziehungsweise Holz). Je mehr Luftzwischenraum vorhanden ist, desto weniger Spannung tilgt die Drosselspule.

215. Grundformel für die Drosselspule. Für die Drosselspule gilt dieselbe Grundformel wie für den Transformator (S. 135).

216. Berechnung einer Drosselspule der Österreichischen Schuckert-Werke. (Fig. 289.) Zwei Lampen zu 8 Ampère und eine Drosselspule sind hintereinander geschaltet und an das Leitungsnetz angeschlossen, Fig. 290.



Stück ~ Liste.

Pos.	Stk.	Gegenstand	Material
1	1	Gehäuse	Gusseisen
2	ca 125	⊔ Bleche	Schmied-
3	" 125	▭ "	"
4	2	⊔ Deckplatten	"
5	1	▭ "	
6	5	Bolzen je 2 Muttern 5×30 Z	Sil. Bez
7		Isolierhülsen	Vulkanfib
8	1	Polbrett	Porzellan
9	2	Klemmschrauben	Schmiedeis.
10	2	Schrauben z. Anpr.	"
11	2	" z. Befestigen	"
12	2	Spulen	Preßspan

Fig. 289. Drosselspule.

Netzspannung 110 Volt, 50 Perioden, zwei Lampen zu je 8 Ampère benötigen je 27 Volt, zusammen 54 Volt bei 8 Ampère. Die Spannung, für welche die Drosselspule zu wickeln ist, beträgt:

$E = \sqrt{\text{Betriebsspannung}^2 - \text{Ohmspannung}^2}$. In unserem Falle: $E = \sqrt{110^2 - 54^2} =$ rund 96 Volt.

Die Windungszahl (S. 135 und § 180, Formel V_1).

$$Z = \frac{10^8\, E}{4{\cdot}44\,.\,B\,Q\,\sim} \quad . \; . \; . \quad V_1.$$ Daraus folgt:

$$Z = \frac{10^8\,.\,96}{4{\cdot}44\,.\,148000\,.\,50} = 292 = 2\,.\,146 \text{ Windungen,}$$

2 *mm* Durchmesser = rund 3·2 mm^2.

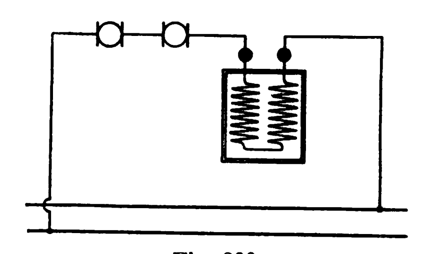


Fig. 290.
Drosselspule und zwei Bogenlampen.

Als Beanspruchung ergeben sich somit

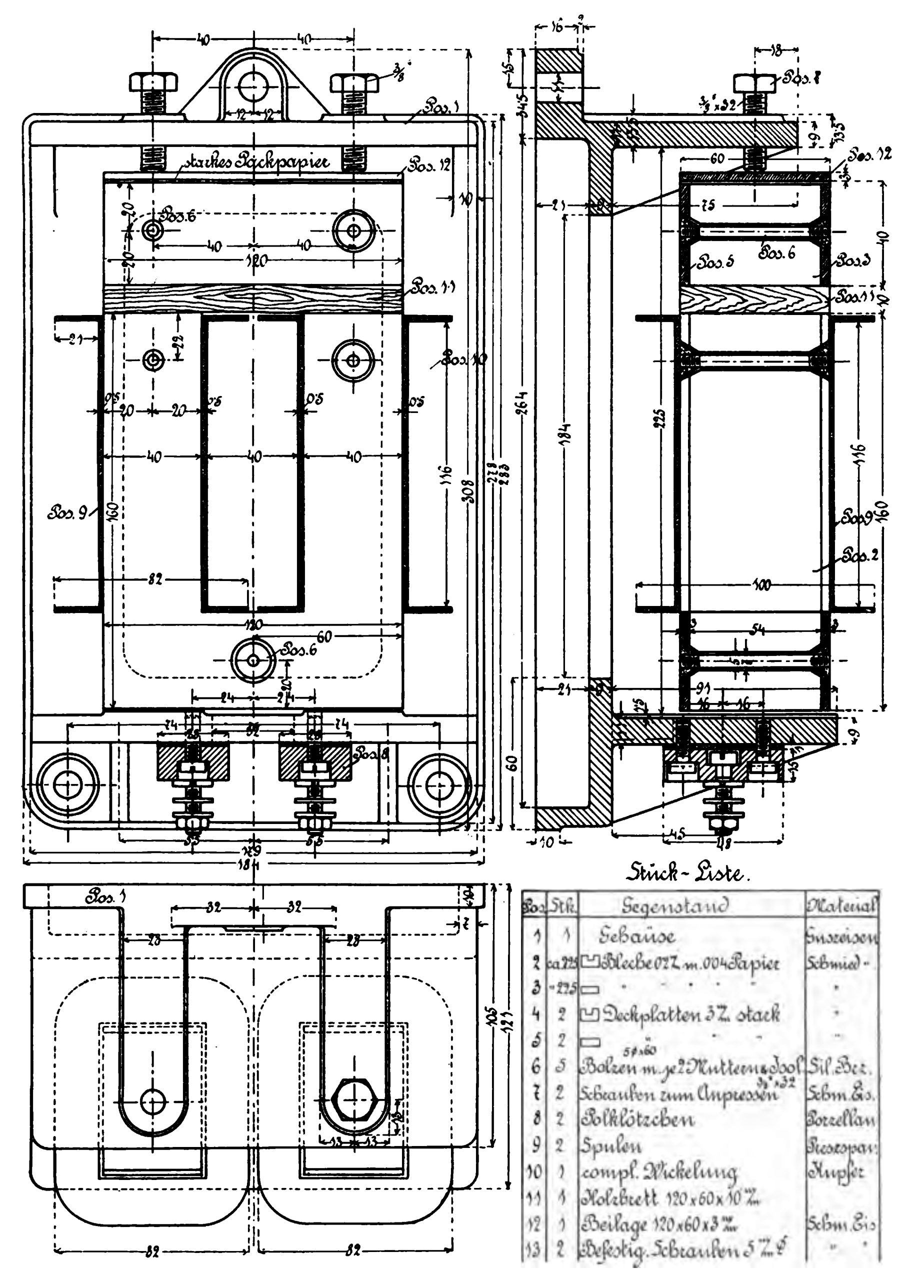
8 Ampère : 3·2 mm^2 = 2·5 Ampère für 1 mm^2.

$Q = 3{\cdot}5\,.\,3 = 10{\cdot}5$ cm^2, Fig. 289.

$B = 148000 : 10{\cdot}5 =$ rund 14000 Kraftlinien für 1 cm^2.

217. Divisor. Der Divisor ist wesentlich eine Drosselspule. Am Anfang, erstes Drittel, zweites Drittel und Ende der Windungen wird bei 118 Volt je eine Leitung angeschlossen, so daß von der Drosselspule vier Leitungen abzweigen. Es zerfällt demnach die Windungszahl in drei Teile. In jedem Teil, also zwischen je zwei Leitungen, schaltet man bei der Verwendung des Divisors je eine Bogenlampe ein, so daß zwischen den vier Leitungen drei Bogenlampen eingeschaltet sind. Der Divisor hat den Zweck, die Spannung zu unterteilen. Dadurch kann in jeden Stromkreis eine einzige Bogenlampe eingeschaltet werden, so daß die einzelnen Lampen voneinander unabhängig sind. Bei der Drosselspule, Fig. 290, dagegen versagen, weil mehrere Lampen hintereinander geschaltet sind, mit der einen Bogenlampe auch die übrigen, wenn nicht besondere Vorrichtungen getroffen werden. Eine solche Vorrichtung besteht z. B. darin, daß sich im Falle des Versagens einer Bogenlampe eine Ersatzdrosselspule oder ein Ersatzwiderstand selbsttätig einschaltet.

218. Berechnung eines Divisors der Österreichischen Schuckert-Werke. (Fig. 291.) Das Schaltungsschema zeigt Fig. 292. Die



Stück-Liste.

Pos.	Stk.	Gegenstand	Material
1	1	Gehäuse	Gusseisen
2	ca 225	Bleche 0·27 m. 0·04 Papier	Schmied-
3	" 225	" " " "	"
4	2	Deckplatten 3 m/m stark	"
5	2	" "	"
6	5	Bolzen m. je 2 Muttern u. Isol. 54×60	Sil. Bez.
7	2	Schrauben zum Anpressen 3/8"×32	Schm. Eis.
8	2	Polklötzchen	Porzellan
9	2	Spulen	Presspan
10	1	compl. Wickelung	Kupfer
11	1	Holzbrett 120×60×10 m/m	
12	1	Beilage 120×60×3 m/m	Schm. Eis.
13	2	Befestig. Schrauben 5 m/m ⌀	" "

Fig. 291. Divisor.

Netzspannung 118 Volt soll in drei Teile zu je 39·3 Volt geteilt werden. Die Lampenspannung beträgt 27 Volt bei 8 Ampère, daher sind für jede Bogenlampe durch Widerstand, welcher gleichzeitig als Beruhigungswiderstand wirken soll, je 39·3—27 = 12·3 = rund 12 Volt, zu vernichten. Der Widerstand beträgt daher bei 8 Ampère 12 : 8 = 1·5 Ohm.

Bezeichnungen:
N = Gesamtzahl der Kraftlinien = $Q\ B$.
E = Spannung in Volt.
$\sim$ = Periodenzahl = 50.
Z = Windungszahl.
Q = Eisenquerschnitt in 1 cm^2 = 20 cm^2, Fig. 291.
B = Kraftlinien für 1 cm^2 = 188000 : 20 = 9400.

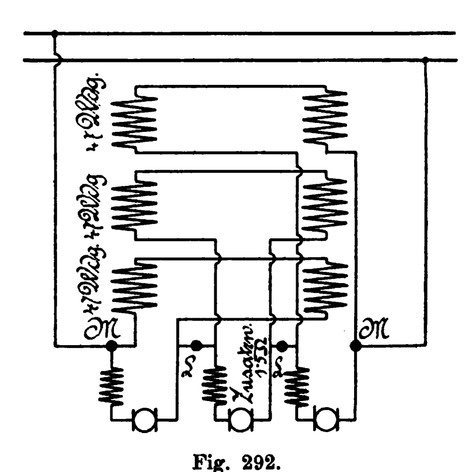


Fig. 292.
Divisor mit drei Bogenlampen.

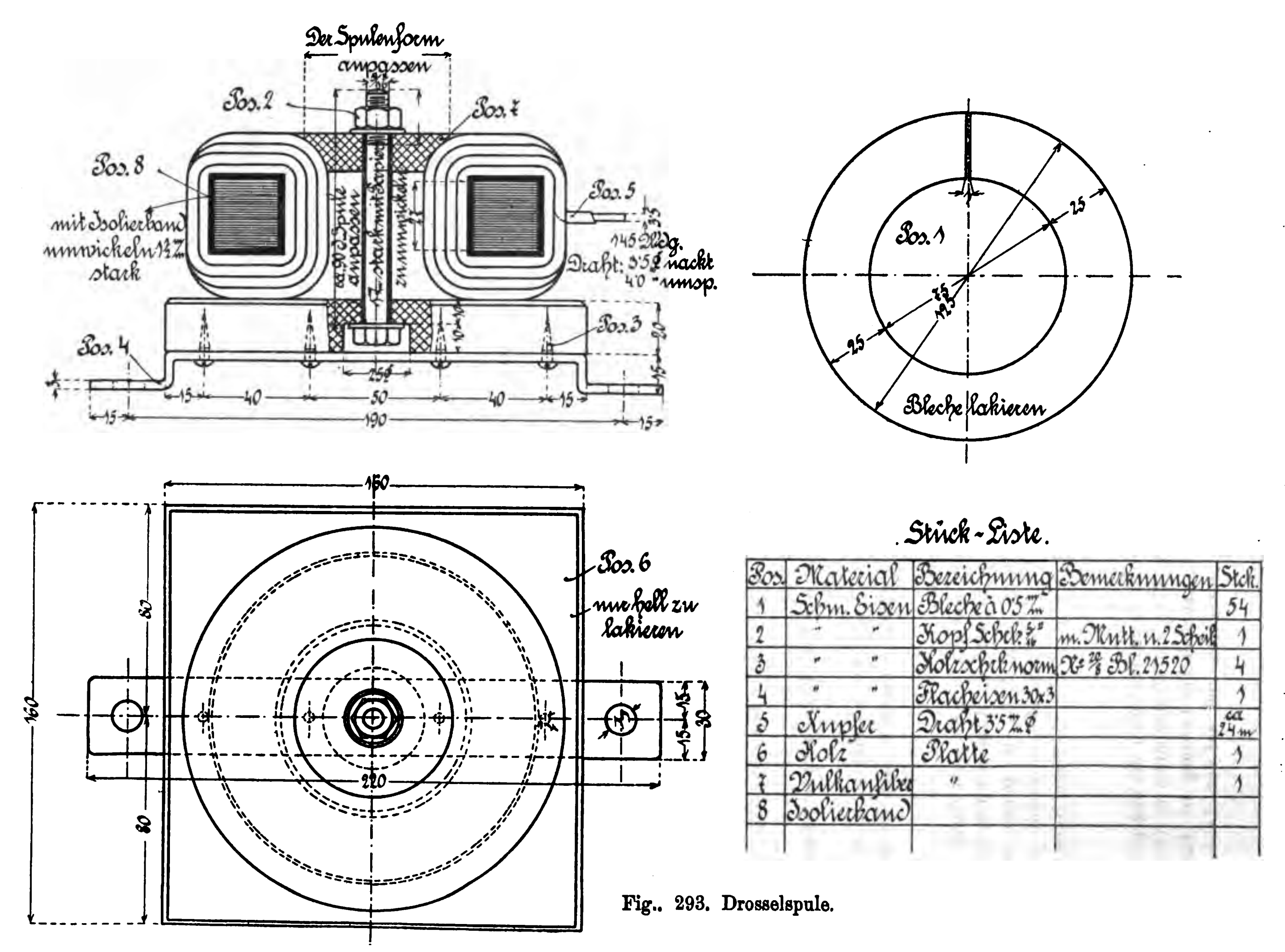
Die Windungszahl der Spulen finden wir (S. 135 und § 180, Formel V_1) folgendermaßen:

$$Z = \frac{10^8\ E}{4{\cdot}44\ .\ B\ Q \sim} = \frac{10^8\ .\ 118}{4{\cdot}44\ .\ 9400\ .\ 20\ .\ 50} = 282 \text{ Windungen.}$$

282 = 2 . 141 = 6 . 47, das sind sechs Spulen zu je 47 Windungen, Fig. 292.

Rechnen wir 2·5 Ampère für 1 mm^2 als Beanspruchung, so erhalten wir bei 8 Ampère 8 : 2·5 = 3·2 mm^2 oder rund 2 mm Durchmesser.

219. Drosselspule der Helios E.-A.-G., Fig. 293, Parallelschaltung mit einer Bogenlampe von 18 Ampère und 30 Volt, Verbrauch an Leistung in der Spule: 18 Watt.



.Stück-Liste.

Pos.	Material	Bezeichnung	Bemerkungen	Stck.
1	Schm. Eisen	Bleche à 0·5 mm		54
2	" "	Kopf Schr. 5/16"	m. Mutt. u. 2 Scheib.	1
3	" "	Holzschr. norm	N° 20/8 Bl. 21520	4
4	" "	Flacheisen 30x3		1
5	Kupfer	Draht 3·5 mm ⌀		ca 24 m
6	Holz	Platte		1
7	Vulkanfiber	"		1
8	Isolierband			

Fig. 293. Drosselspule.

1. Anhang.

Entwurf zu Normalien zur Prüfung von elektrischen Maschinen und Transformatoren. [1])

Definitionen.

Dynamo ist jede rotierende Maschine zur Umwandlung von elektrischer in elektrische, elektrischer in mechanische oder mechanischer in elektrische Leistung.

Generator ist jede rotierende Maschine, die mechanische in elektrische Leistung verwandelt.

Motor ist jede rotierende Maschine, die elektrische in mechanische Leistung verwandelt.

Motorgenerator ist eine Doppelmaschine, bestehend in der direkten mechanischen Kupplung eines Motors mit einem Generator.

Umformer ist eine Maschine, bei welcher die Umformung des Stromes in einem gemeinsamen Anker stattfindet.

Wird in folgendem das Wort Dynamo oder Maschine schlechthin gebraucht, so ist darunter, je nach dem Zusammenhang, einer der vorgenannten Gegenstände zu verstehen.

Anker ist bei Dynamos derjenige Teil, in welchem durch die Einwirkungen eines magnetischen Feldes elektromotorische Kräfte erzeugt werden.

Transformator ist eine Vorrichtung für Wechselströme ohne bewegte Teil zur Umwandlung elektrischer in elektrische Leistung.

Unter Spannung bei Drehstrom ist die verkettete effektive Spannung (Spannung zwischen je zwei der drei Hauptleitungen) zu verstehen.

Unter Übersetzung bei Transformatoren ist das Verhältnis der Spannungen bei Leerlauf zu verstehen.

Unter Frequenz ist die Anzahl der vollen Perioden in der Sekunde zu verstehen.

Die für Wechselstrom gegebenen Vorschriften gelten sinngemäß auch für Mehrphasenstrom.

Allgemeine Bestimmung.

§ 1. Die folgenden Bestimmungen gelten nur insofern, als sie nicht durch ausdrücklich vereinbarte Lieferungsbedingungen abgeändert werden. Ausgenommen hievon sind die Vorschriften über die Leistungsschilder (vergl. §§ 4, 5, 6), die immer erfüllt sein müssen. Maschinen oder Transformatoren ohne Leistungsschild oder mit einem anderen als den weiter unten vorgeschriebenen Leistungsschild werden als diesen Normalien nicht entsprechend angesehen.

Leistung.

§ 2. Als Leistung gilt bei allen Maschinen und Transformatoren die abgegebene. Dieselbe ist anzugeben bei Gleichstrom in Kilowatt (*KW*), bei Wechselstrom in Kilowatt mit Angabe des Leistungsfaktors. Bei Abgabe von mechanischer Leistung ist dieselbe in Pferdestärken (*PS*) anzugeben. Außerdem sind anzugeben und auf dem Leistungs-

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift 1901, S. 477.
Siehe auch G. Dettmar, Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 489.



schild (vergl. §§ 4, 5, 6) oder auf einem besonderen Schild zu verzeichnen die normalen Werte von Tourenzahlen beziehungsweise Frequenz, Spannung und Stromstärke.

§ 3. In Bezug auf die Leistung sind folgende Betriebsarten zu unterscheiden:

a) der intermittierende Betrieb, bei dem nach Minuten zählende Arbeitsperioden und Ruhepausen abwechseln (z. B. Motoren für Kräne, Aufzüge, Straßenbahnen u. dgl.);

b) der kurzzeitige Betrieb, bei dem die Arbeitsperiode kürzer ist als nötig, um die Endtemperatur zu erreichen, und die Ruhepause lang genug, damit die Temperatur wieder annähernd auf die Lufttemperatur sinken kann;

c) der Dauerbetrieb, bei dem die Arbeitsperiode so lang ist, daß die Endtemperatur erreicht wird.

§ 4. Als normale Leistung von Maschinen und Transformatoren für intermittierende Betriebe ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche ohne Unterbrechung eine Stunde lang abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig bezeichneten Wert überschreitet. Diese Leistung ist auf einem Schild unter der Bezeichnung „intermittierend" anzugeben.

§ 5. Als normale Leistung von Maschinen und Transformatoren für kurzzeitigen Betrieb ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche während der vereinbarten Betriebszeit abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig bezeichneten Wert überschreitet. Diese Leistung ist unter der Bezeichnung „für . . . . . St" auf einen Schild anzugeben.

§ 6. Als normale Leistung von Maschinen und Transformatoren für Dauerbetrieb ist die Leistung zu verstehen und anzugeben, welche während beliebig langer Zeit abgegeben werden kann, ohne daß die Temperaturzunahme den weiter unten als zulässig angegebenen Wert überschreitet. Diese Leistung ist auf einem Schild unter der Bezeichnung „dauernd" anzugeben.

§ 7. Die gleichzeitige Angabe der Leistung für verschiedene Betriebsarten ist zulässig.

§ 8. Bei Generatoren und Umformern mit veränderlicher Spannung genügt die Verzeichnung der normalen Werte von Spannung, Stromstärke und Tourenzahl auf dem Schild; die zusammengehörigen Grenzwerte müssen jedoch in den Lieferungsbedingungen angegeben werden.

§ 9. Maschinen mit Kommutator müssen bei jeder Belastung innerhalb der zulässigen Grenzen bei günstiger Bürstenstellung und eingelaufenen Bürsten so weit funkenfrei laufen, daß ein Behandeln des Kommutators mit Glaspapier oder dergl. höchstens nach je 24 Betriebsstunden erforderlich ist.

Temperaturzunahme.

§ 10. Die Temperaturzunahme von Maschinen und Transformatoren ist bei normaler Leistung und unter Berücksichtigung der oben definierten Betriebsarten zu messen nämlich:

1. Bei intermittierenden Betrieben nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes von einer Stunde;

2. bei kurzzeitigen Betrieben nach Ablauf eines ununterbrochenen Betriebes während der auf dem Leistungsschild verzeichneten Betriebszeit;

3. bei Dauerbetrieben:

a) bei Maschinen nach Ablauf von zehn Stunden;

b) bei Transformatoren nach Ablauf jener Betriebszeit, welche nötig ist, um die stationäre Temperatur zu erreichen.



§ 11. Sofern für kleinere Maschinen unzweifelhaft feststeht, daß die stationäre Temperatur in weniger als zehn Stunden erreicht wird, so kann die Temperaturzunahme nach entsprechend kürzerer Zeit gemessen werden.

§ 12. Bei der Prüfung auf Temperaturzunahme dürfen die betriebsmäßig vorgesehenen Umhüllungen, Abdeckungen, Ummantelungen u. s. w. von Maschinen und Transformatoren nicht entfernt, geöffnet oder erheblich verändert werden. Eine etwa durch den praktischen Betrieb hervorgerufene und bei der Konstruktion in Rechnung gezogene Kühlung kann im allgemeinen bei der Prüfung nachgeahmt werden, jedoch ist es nicht zulässig, bei Straßenbahnmotoren den durch die Fahrt erzeugten Luftzug bei der Prüfung künstlich herzustellen.

§ 13. Als Lufttemperatur gibt jene der zuströmenden Luft oder, wenn keine entschiedene Luftströmung bemerkbar ist, die mittlere Temperatur der die Maschine umgebenden Luft in Höhe der Maschinenmitte, wobei in beiden Fällen in etwa 1 *m* Entfernung von der Maschine zu messen ist. Die Lufttemperatur ist während des letzten Viertels der Versuchszeit in regelmäßigen Zeitabschnitten zu messen und daraus der Mittelwert zu nehmen.

§ 14. Wird ein Thermometer zur Messung der Temperatur verwendet, so muß eine möglichst gute Wärmeleitung zwischen diesem und dem zu messenden Maschinenteil herbeigeführt werden, z. B. durch Stanniolumhüllung. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten wird die Kugel des Thermometers und die Meßstelle außerdem mit einem schlechten Wärmeleiter (trockener Putzwolle u. dergl.) überdeckt. Die Ablesung findet erst statt, nachdem das Thermometer nicht mehr steigt.

§ 15. Mit Ausnahme der mit Gleichstrom erregten Feldspulen werden alle Teile der Generatoren und Motoren mittels Thermometer auf ihre Temperaturzunahme untersucht. So weit wie möglich sind jeweilig die Punkte höchster Temperatur zu ermitteln und die dort gemessenen Temperaturen bei Bestimmung der Temperaturzunahme zu verwenden.

§ 16. Die Temperatur der mit Gleichstrom erregten Feldspulen ist aus der Widerstandszunahme zu bestimmen. Dabei ist, wenn der Temperaturkoeffizient des Kupfers nicht für jeden Fall besonders bestimmt wird, dieser Koeffizient als 0·004 anzunehmen.

§ 17. Bei Transformatoren wird die höchste an irgend einem Punkte vorkommende Temperatur der Wicklungen durch Thermometer gemessen. Bei Öltransformatoren wird die Temperatur der oberen Ölschichten gemessen.

§ 18. In gewöhnlichen Fällen und sofern die Lufttemperatur 35° C. nicht übersteigt, sollen folgende Werte der Temperaturzunahmen bei isolierten Wicklungen, Kollektoren und Schleifringen nicht überschritten werden:

Bei Baumwollisolierung	50° C.
„ Papierisolierung	60° „
„ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate . . .	80° „

Bei ruhenden Wicklungen sind um 10° C. höhere Werte zulässig.

§ 19. Bei Straßenbahnmotoren sollen nach einstündigem ununterbrochenem Betrieb mit normaler Belastung im Versuchsraum folgende Werte der Temperaturzunahme nicht überschritten werden:

Bei Baumwollisolierung	70° C.
„ Papierisolierung	80° „
„ Isolierung durch Glimmer, Asbest und deren Präparate . .	100° „

§ 20. Bei kombinierten Isolierungen gilt die untere Grenze.

§ 21. Bei dauernd kurzgeschlossenen Wicklungen können vorstehende Grenzwerte überschritten werden.

Überlastung.

§ 22. Im praktischen Betriebe sollen Überlastungen nur so kurze Zeit oder bei solchem Temperaturzustand der Maschinen und Transformatoren vorkommen, daß die zulässige Temperaturzunahme dadurch nicht überschritten wird. Mit dieser Einschränkung müssen Maschinen und Transformatoren in den folgenden Grenzen überlastungsfähig sein:

Generatoren Motoren Umformer	25% während $^1/_2$ Stunde, wobei bei Wechselstromgeneratoren der Leistungsfaktor nicht unter dem auf dem Schilde verzeichneten Werte anzunehmen ist.
Motoren Umformer Transformatoren	40% während 3 Minuten, wobei für Motoren die normale Klemmenspannung einzuhalten ist.

Der Kommutator der Gleichstrommaschinen und Umformer darf hiebei nicht so stark angegriffen werden, daß der Gang bei normaler Leistung dem § 9 nicht mehr genügt.

§ 23. Generatoren müssen bei konstanter Tourenzahl die Spannung bis zu 15% Überlastung konstant halten können, wobei der Leistungsfaktor bei Wechselstromgeneratoren nicht unter dem auf dem Schilde verzeichneten Werte anzunehmen ist.

§ 24. Die Prüfung soll die mechanische und elektrische Überlastungsfähigkeit ohne Rücksicht auf Erwärmung feststellen und deshalb bei solcher Temperatur beginnen, daß die zulässige Temperaturzunahme nicht überschritten wird.

§ 25. Diese Vorschriften gelten auch für Generatoren mit veränderlicher Spannung, bei denen die Spannungsänderung durch annähernd proportionale Änderung der Tourenzahl erreicht wird. Bei Generatoren mit annähernd konstanter Tourenzahl (so daß sie bei normaler Spannung mit abgeschwächtem Felde arbeiten) ist von einer Überlastungsprobe abzusehen. Das Gleiche gilt von Motoren, wenn sie mit abgeschwächtem Felde arbeiten.

Isolation.

§ 26. Die Messung des Isolationswiderstandes wird nicht vorgeschrieben, wohl aber eine Prüfung auf Isolierfestigkeit (Durchschlagsprobe), welche am Erzeugungsort, bei größeren Objekten auch vor Inbetriebsetzung am Aufstellungsort vorzunehmen ist. Maschinen und Transformatoren müssen im stande sein, eine solche Probe mit einer im nachfolgenden festgesetzten höheren Spannung, als die normale Betriebsspannung ist, $^1/_2$ Stunde lang auszuhalten. Die Prüfung ist bei warmem Zustande der Maschine vorzunehmen und später nur ausnahmsweise zu wiederholen, damit die Gefahr einer späteren Beschädigung vermieden wird.

Maschinen und Transformatoren bis 5000 V sollen mit der doppelten Betriebsspannung, jedoch nicht mit weniger als 100 V geprüft werden. Maschinen und Transformatoren von 5000 bis 10.000 V sind mit 5000 V Überspannung zu prüfen. Von 10.000 V an beträgt die Prüfspannung das Eineinhalbfache der Betriebsspannung.

§ 27. Diese Prüfspannungen beziehen sich auf Isolation von Wicklungen gegen das Gestell, sowie bei elektrisch getrennten Wicklungen gegeneinander. Im letzteren Falle ist bei Wicklungen verschiedener Spannung immer die höchste sich ergebende Prüfspannung anzuwenden.

§ 28. Zwei elektrisch verbundene Wicklungen verschiedener Spannung sind gleichfalls mit der der Wicklung höchster Spannung entsprechenden Prüfungsspannung gegen Gestell zu prüfen.

§ 29. Sind Maschinen oder Transformatoren in Serie geschaltet, so sind, außer obiger Prüfung, die verbundenen Wicklungen mit einer der Spannung des ganzen Systems entsprechenden Prüfspannung gegen Erde zu prüfen.

§ 30. Obige Angaben über die Prüfspannung gelten unter der Annahme, daß die Prüfung mit gleicher Stromart vorgenommen wird, mit welcher die Wicklungen im Betriebe benutzt werden. Sollte dagegen eine betriebsmäßig von Gleichstrom durchflossene Wicklung mit Wechselstrom geprüft werden, so braucht nur der 0·7fache Wert der vorgenannten Prüfspannung angewendet werden. Wird umgekehrt eine betriebsmäßig von Wechselstrom durchflossene Wicklung mit Gleichstrom geprüft, so muß die Prüfspannung 1·4mal so hoch genommen werden, wie oben angegeben.

§ 31. Ist eine Wicklung betriebsmäßig mit dem Gestell leitend verbunden, so ist diese Verbindung für die Prüfung auf Isolierfestigkeit zu unterbrechen. Die Prüfspannung einer solchen Wicklung gegen Gestell richtet sich dann aber auch nur nach der größten Spannung, welche zwischen irgend einem Punkte der Wicklung und des Gestelles im Betriebe auftreten kann.

§ 32. Für Magnetspulen mit Fremderregung ist die Prüfspannung das Dreifache der Erregerspannung, jedoch mindestens 100 *V.*

§ 33. Die Wicklung des Sekundärankers asynchroner Motoren ist mit der doppelten Anlaufspannung zu prüfen, jedoch mindestens mit 100 *V.* Kurzschlußanker brauchen nicht geprüft werden.

Wirkungsgrad.

§ 34. Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der abgegebenen zur zugeführten Leistung. Er kann durch direkte Messung der Leistungen oder indirekt durch Messung der Verluste bestimmt werden. Die indirekten Methoden sind leichter durchzuführen, durch Beobachtungsfehler weniger beeinflußt und aus diesen Gründen in der Regel vorzuziehen. Bei Angabe des Wirkungsgrades ist die Methode zu nennen, nach welcher er bestimmt werden soll beziehungsweise bestimmt wurde, wozu ein Hinweis auf den entsprechenden Paragraphen dieser Normalien genügt.

Die Angabe des Wirkungsgrades soll sich stets auf die dem normalen Betriebe entsprechende Erwärmung beziehen.

Der Wirkungsgrad ist unter Berücksichtigung der Betriebsart (vergl. §§ 4, 5, 6) anzugeben.

Der Wirkungsgrad ohne besondere Angabe der Belastung bezieht sich auf die normale Belastung.

Die für Felderregung nötige und im Feldrheostat verlorene Leistung ist als Verlust in Rechnung zu ziehen.

§ 35. Für Generatoren, synchrone Motoren und Transformatoren ist der Wirkungsgrad unter Voraussetzung von Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung anzugeben.

§ 36. Bei Maschinen mit besonderen Erregermaschinen ist der Wirkungsgrad beider Maschinen getrennt anzugeben.

Methoden zur Bestimmung des Wirkungsgrades.

§ 37. Die direkte elektrische Methode: Diese Methode kann angewendet werden bei Motorgeneratoren, Umformern und Transformatoren, indem man die abgegebene sowie zugeführte Leistung durch elektrische Messungen ermittelt. Zwecks Verwendung gleichartiger Meßinstrumente empfiehlt es sich bei dieser Methode, gleichartige Maschinen und Transformatoren paarweise zu prüfen.

§ 38. Die indirekte elektrische Methode: Sind zwei Maschinen gleicher Leistung, Type und Stromart vorhanden, so werden sie mechanisch und elektrisch derart gekuppelt, daß die eine als Generator, die andere als Motor läuft. Der Betrieb des Systems erfolgt durch Stromzuführung von einer äußeren Stromquelle aus in der Weise, daß nur die zur Deckung der Verluste nötige Leistung zugeführt und gemessen wird. Der Betriebszustand der beiden Maschinen ist so einzuregulieren, daß der Mittelwert zwischen der dem Motor zugeführten und der vom Generator abgegebenen Leistung so nahe als möglich gleich ist der normalen Leistung der einzelnen Maschinen. Dieser Mittelwert wird durch Messung bestimmt. Die zur Deckung der Verluste nötige Leistung kann auch mechanisch zugeführt und elektrisch gemessen werden. Ist bei diesen Messungen Riemenübertragung nicht zu vermeiden, so sind die dadurch verursachten Verluste entsprechend zu berücksichtigen.

Die vorstehend beschriebene Methode ist auch bei Transformatoren anwendbar, sofern dieselben in Bezug auf Leistung, Spannung und Frequenz identisch sind.

Der in etwaigen Hülfsapparaten entstehende Verlust ist sinngemäß zu berücksichtigen.

§ 39. Die direkte Bremsmethode: Diese Methode ist im allgemeinen bei kleineren Motoren brauchbar, kann aber für einen kleineren Generator, der sich als Motor betreiben läßt, auch verwendet werden, doch müssen dann die Verhältnisse so gewählt werden, daß die magnetische und mechanische Beanspruchung, Tourenzahl und Leistung während der Prüfung möglichst wenig von den entsprechenden Größen bei der Benutzung als Generator abweichen.

§ 40. Die indirekte Bremsmethode: Ist ein Generator beziehungsweise Motor von entsprechender Leistung vorhanden, dessen Wirkungsgrad bei verschiedenen Belastungen genau bekannt ist, so kann dieser als Bremse beziehungsweise als Antriebsmotor benutzt werden.

Wird hiebei eventuell eine Riemenübertragung verwendet, so ist der dadurch entstehende Verlust zu berücksichtigen.

§ 41. Leerlaufmethode: Bei Leerlauf als Motor wird der Verlust, welcher zum Betriebe der Maschine bei normaler Tourenzahl und Feldstärke in eingelaufenem Zustande auftritt, bestimmt. Dieser stellt den durch Luft-, Lager- und Bürstenreibung, Hysteresis und Wirbelströme bedingten Verlust dar, dessen Änderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird.

Durch elektrische Messungen und Umrechnungen wird der Verlust durch Stromwärme in Feld-, Anker-, Bürsten- und Übergangswiderstand bei entsprechender Belastung ermittelt, wobei bezüglich des letzteren auf die Bewegung und die richtige Stromstärke, bezüglich der ersteren auf den warmen Zustand der Maschine Rücksicht zu nehmen ist. Bei asynchronen Motoren können die Verluste im Sekundäranker anstatt durch Widerstandsmessungen durch Messung der Schlüpfung bestimmt werden.

Ein etwaiger bei normalem Betriebe in einem Vorschaltwiderstand für die Feldwicklung auftretender Verlust ist mit in Rechnung zu ziehen. Diese Methode ist auch sinngemäß für Transformatoren verwendbar.

Die Summe der vorstehend erwähnten Verluste wird als „meßbarer Verlust“ bezeichnet. Als Wirkungsgrad wird angesehen das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „meßbarem Verlust“.

§ 42. Hülfsmotormethode: Stellen sich der direkten Ermittlung des Verlustes für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie für Hysteresis und Wirbelströme in gewissen Fällen Schwierigkeiten entgegen oder ist eine gleichartige Stromquelle, wie die zu untersuchende Maschine nötig hat, nicht vorhanden, so kann der Verlust für Luft- und

Lagerreibung sowie für Hysteresis und Wirbelströme durch einen Hülfsmotor festgestellt werden. Die Feststellung des Verlustes für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie Hysteresis und Wirbelströme der zu untersuchenden Maschine hat dann dadurch zu geschehen, daß man die dem antreibenden Motor zugeführte Leistung bei normaler Erregung der zu untersuchenden Maschine feststellt und davon die im Hülfsmotor sowie die in der eventuellen Riemenübertragung entstehenden Verluste abzieht. Die Verluste im Hülfsmotor sind durch Leerlauf des Hülfsmotors bei gleicher Tourenzahl und Spannung wie während des ersten Versuches festzustellen sowie durch die Belastung hinzukommende Verluste in Feld-, Anker-, Bürsten- und Übergangswiderstand durch elektrische Messungen entsprechend den Angaben unter § 41 zu bestimmen. Im übrigen ist bezüglich der zu untersuchenden Maschine genau wie im § 41 zu verfahren und ist auch der Wirkungsgrad in gleicher Weise definiert.

Als Hülfsmotor kann auch die Antriebsdampfmaschine verwendet werden, wenn sie von der Dynamo abkuppelbar ist. Die Ermittlung muß dann in der Weise vorgenommen werden, daß zuerst die Dampfmaschine einschließlich unbelastetem Generator mit normaler Tourenzahl und Erregung und dann, wieder nachdem die Kupplung gelöst ist, die Dampfmaschine allein indiziert wird. Die Differenz zwischen beiden ist als Leerlaufverlust für Luft-, Lager- und Bürstenreibung sowie für Hysteresis und Wirbelströme zu betrachten, wobei auf etwaige gleichzeitig von der Dampfmaschine erzeugte Erregung Rücksicht zu nehmen ist.

Wegen der den Leerlaufdiagrammen anhaftenden Ungenauigkeit ist diese Methode mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

§ 43. Indikatormethode: Wird der Generater durch eine Dampfmaschine direkt angetrieben und ist er nicht abkuppelbar, so ist der Wirkungsgrad ohne Rücksicht auf Reibung zu bestimmen. Die bei Leerlauf auftretenden Hysteresis- und Wirbelstromverluste sind bei normaler Tourenzahl und Klemmenspannung mit Indikatordiagrammen derart zu bestimmen, daß die Dampfmaschine bei erregtem und unerregtem Felde indiziert wird. Wird die Erregung von der gleichen Dampfmaschine geliefert, so ist die dafür benötigte Leistung in Abzug zu bringen. Die verbleibende Differenz wird als der durch Hysteresis und Wirbelstrom bei Leerlauf erzeugte Verlust angesehen, dessen Änderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Durch elektrische Messungen und Umrechnungen wird der Verlust durch Stromwärme in Feld-, Anker-, Bürsten und deren Übergangswiderstand bei Belastung ermittelt, wobei bezüglich des letzteren auf die Bewegung und die richtige Stromstärke, bezüglich der ersteren auf den warmen Zustand der Maschine Rücksicht zu nehmen ist Ein etwaiger bei normalem Betriebe in einem Vorschaltwiderstand für die Feldwicklung auftretender Verlust ist mit in Rechnung zu ziehen. Die Summe der vorstehend erwähnten Verluste wird als „meßbarer Verlust“ bezeichnet. Als Wirkungsgrad wird das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „meßbarem Verlust“ angesehen. Wegen der den Leerlaufdiagrammen anhaftenden Ungenauigkeit ist diese Methode mit besonderer Vorsicht zu verwenden.

§ 44. Trennungsmethode: Bei Maschinen, die nur unter Benutzung von fremden Lagern arbeiten können, ist der Wirkungsgrad ohne Rücksicht auf Reibung in folgender Weise zu bestimmen. Der Verlust für Hysteresis und Wirbelströme wird elektrisch festgestellt dadurch, daß die Maschine in ähnlicher Weise wie bei der Leerlaufmethode als Motor laufend, untersucht wird. Um den Verlust für Luft-, Lager- und Bürstenreibung von dem Verlust für Hysteresis und Wirbelströme trennen zu können, ist in folgender Weise zu verfahren: Die Maschine muß bei mehreren verschiedenen Spannungen mit normaler Umlaufzahl in eingelaufenem Zustande untersucht werden, und zwar soll man mit der Spannung so weit wie möglich nach unten gehen, jedoch

auch Beobachtungswerte bei normaler Spannung und wenn möglich bei 25% höherer Spannung aufnehmen. Diese Beobachtungswerte sind graphisch aufzutragen und es ist die erhaltene Kurve so zu verlängern, daß der bei der Spannung „Null" auftretende Verlust ermittelt werden kann.

Dieser Wert gibt den Reibungsverlust an und ist von dem bei normaler Spannung beobachteten Leerlaufverlust in Abzug zu bringen.

Der Rest ist als Verlust für Hysteresis und Wirbelströme anzusehen, dessen Änderung mit der Belastung nicht berücksichtigt wird. Die übrigen Verluste sind entsprechend § 41 elektrisch zu ermitteln. Die Summe von Hysteresis und Wirbelstromverlust sowie die Verluste durch Stromwärme in Feld-, Anker-, Bürsten- und deren Übergangswiderstand bei Belastung werden als „messbarer Verlust" bezeichnet und wird als der Wirkungsgrad das Verhältnis der Leistung zur Summe von Leistung und „meßbarem Verlust" angesehen.

Die Ermittlung des Hysteresis- und Wirbelstromverlustes kann auch mittels Hülfsmotor vorgenommen werden.

Spannungsänderung.

§ 45. Die Spannungsänderung der Wechselstromgeneratoren ist anzugeben für normalen Ankerstrom bei induktionsloser Belastung und für ein Drittel des normalen Ankerstromes bei induktiver Belastung, deren Leistungsfaktor 0·3 nicht übersteigt.

§ 46. Spannungsänderung bei induktionsloser Belastung ist derjenige Spannungsunterschied, den man erhält, wenn man die vollbelastete Maschine (Leistungsfaktor = 1 vollständig entlastet unter Einhaltung der normalen Tourenzahl und der bei Vollbelastung benötigten Erregung.

§ 47. Als Spannungsänderung bei induktiver Belastung gilt derjenige Spannungsunterschied, den man erhält, wenn man den Ankerstrom abschaltet, ohne Umlaufzahl und Erregung zu ändern. Die Maschine muß vor Abschaltung mit einem Drittel des normalen Ankerstromes bei einem Leistungsfaktor von nicht mehr als 0·3 belastet und so erregt sein, daß sie die normale Klemmenspannung gibt.

§ 48. Bei Maschinen für induktionslose Belastung braucht die unter § 47 angegebene Spannungsänderung nicht geprüft zu werden. Bei Maschinen für induktive Belastung braucht die unter § 46 angegebene Spannungsänderung nicht geprüft zu werden.

§ 49. Sollen Gleichstrommaschinen auf Spannungsänderung geprüft werden, so gilt folgendes: Gleichstrommaschinen mit Nebenschlußerregung, mit gemischter Erregung und mit Fremderregung werden ohne Nachregulierung der Erregung von Vollbelastung bei normaler Spannung bis hinab auf Leerlauf bei gleichbleibender normaler Tourenzahl in wenigstens vier annähernd gleichen Abstufungen der Belastung geprüft. Der Unterschied zwischen der größten und der kleinsten beobachteten Spannung gilt als Spannungsänderung. Bezüglich Verstellung der Bürsten gilt das für den Betrieb Vereinbarte.

§ 50. Bei Transformatoren ist sowohl der Ohmsche Spannungsverlust als auch die Kurzschlußspannung bei normaler Stromstärke anzugeben, beides auf den Sekundärkreis bezogen. Der Ohmsche Spannungsverlust gilt als Spannungsänderung bei induktionsloser Belastung, die Kurzschlußspannung als Spannungsänderung bei induktiver Belastung.

Es ist zulässig, den Versuch bei einer von der normalen nicht allzusehr abweichenden Stromstärke zu machen; die Spannungsänderungen müssen dann aber auf normale Stromstärke proportional umgerechnet werden.



2. Anhang.

Entwurf zu Normalien für die Prüfung von Eisenblech.[1])

1. Der Gesamtverlust im Eisen ist mittels Wattzeiger an einer aus vier Tafeln entnommenen Probe von mindestens 10 *kg* zu bestimmen und wird für $B_{max} = 10000$ und 50 Perioden in Watt per 1 *kg* angegeben; diese Zahl heißt „Verlustziffer“.

2. Als normale Blechstärken gelten 0·3 und 0·5 *mm*; Abweichungen der Blechstärken dürfen an keiner Stelle $\pm$ 10% der vorgeschriebenen überschreiten.

3. Für die Messungen dient ein magnetischer Kreis, welcher ausschließlich Eisen der zu prüfenden Qualität enthält und nach der in der Ausführungsbestimmung gegebenen Weise zusammengesetzt ist.

4. Als spezifisches Gewicht des Eisens soll 7·7 angenommen werden, soweit keine genaueren Bestimmungen vorliegen.

5. In Zweifelfällen gilt die Untersuchung durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt, Charlottenburg, als maßgebend.

---

[1]) Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 517. Siehe auch J. A. Möllinger: Elektrotechnische Zeitschrift, 1901, S. 379. Benischke: Elektrotechnische Zeitschrift, 1902, S. 464.

Namen- und Sachverzeichnis.

Die Namen und Firmen sind gesperrt gesetzt.

K. u. K. Hofbuchdruckerei Karl Prochaska in Teschen.




G.E.STECHERT
& CO.
NEW YORK



